

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Электроники, телекоммуникации и космических технологий

Байхожаев Алмат Серікұлы

Исследование волоконно-оптических датчиков для мониторинга чрезвычайных ситуаций

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7M06201 – «Телекоммуникация»

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологии

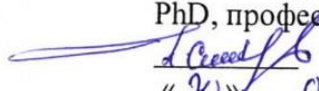
УДК 621.396.946 (043)

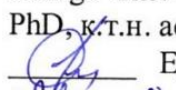
На правах рукописи

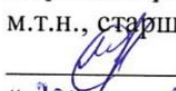
Байхожаев Алмат Серікұлы

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
На соискание степени магистра технических наук

Название диссертации «Исследование волоконно-оптических датчиков для
мониторинга чрезвычайных ситуаций»
Направление подготовки 7M06201 – «Телекоммуникация»

Научный руководитель
PhD, профессор.
 Смайлов Н.К.
« 30 » 01 2026 г.

Рецензент
Energo University,
PhD, к.т.н. ассоц. профессор
 Ермекбаев М.М.
« 29 » 01 2026 г.

Норм контроль
м.т.н., старший преподаватель
 Маркұлы С.
« 30 » 01 2026 г.



Алматы 2026

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Электроники, телекоммуникации и космических технологий

7M06201 – «Телекоммуникация»



УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой ЭТиКТ
К.т.н., профессор
Тангтай Е.
2024 г.

**ЗАДАНИЕ
для магистерской диссертации**

Магистрант Байхожаев Алмат Серікұлы

Тема диссертации: «Исследование волоконно-оптических датчиков для мониторинга чрезвычайных ситуаций»

Утверждено приказом Ректора университета №133-П/Ө «28» марта 2024 г.

Срок сдачи законченной диссертации 26.12.2025 г.

Исходные данные магистерской диссертации: волоконно-оптические датчики, волоконные брэгговские решётки, FBG-датчики, распределённый мониторинг, чрезвычайные ситуации, критически важная инфраструктура, температурные воздействия, деформационные воздействия, спектральный отклик, смещение брэгговской длины волны, численное моделирование, OptiSystem, помехоустойчивые системы.

Список вопросов, которые будут рассмотрены в магистерской диссертации: а) Анализ современных волоконно-оптических сенсорных технологий, применяемых для мониторинга чрезвычайных ситуаций и критически важной инфраструктуры, и обоснование целесообразности использования датчиков на основе волоконных брэгговских решёток; б) Исследование физического принципа работы и спектральных характеристик волоконно-оптического датчика с брэгговской решёткой при воздействии температуры и механической деформации; в) Численное моделирование отклика FBG-датчика на температурные и деформационные воздействия в специализированной программной среде и анализ смещения брэгговской длины волны; г) Оценка возможностей применения FBG-датчиков в системах раннего обнаружения чрезвычайных ситуаций с точки зрения чувствительности, помехоустойчивости и практической реализуемости.

Рекомендуемая основная литература:

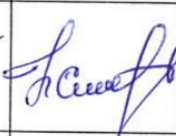


- 1 Kashyap R. Fiber Bragg Grating Sensors: Principles and Applications. – Academic Press, 2021. – 512 с.
- 2 Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors. // Optical Fiber Technology. – 2021. – Vol. 63. – P. 102610.
- 3 Li D., Chen L., Bao X. Distributed Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring: From Fundamentals to Applications. – Sensors, 2022. – 22(5). – 1873.
- 4 Zhang J., Wang Y. Recent Advances in Fiber Optic Sensors for Temperature and Strain Measurement. // IEEE Sensors Journal. – 2023. – Vol. 23, No. 14. – P. 15121–15135.

ТАБЛИЦА
подготовки магистерской диссертации

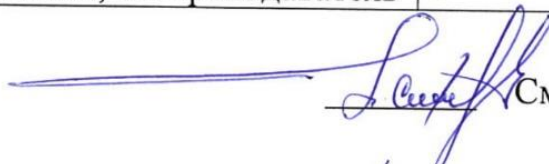
Название раздела, список вопросов для рассмотрения.	Сроки представления научному руководителю	Замечание
Теоретические основы волоконно-оптических датчиков	02.04.2024-21.09.2024	Выполнено
Машинное обучение в волоконно-оптических системах мониторинга	22.09.2024-23.10.2025	Выполнено
Моделирование отклика ВОД с Брэгговской решёткой	24.10.2025-12.11.2025	Выполнено
Архитектура системы мониторинга ЧС на основе DFOS	13.11.2025-05.12.2025	Выполнено

Подписи

консультантов и ответственных за соблюдение норм в соответствующих разделах для защиты магистерской диссертации

Названия разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Моделирование отклика ВОД с Брэгговской решёткой	Н.К. Смайлов PhD, профессор	12.11.25	
Архитектура системы мониторинга ЧС на основе DFOS	Н.К. Смайлов PhD, профессор	05.12.25	
Норм контролер	С. Марксұлы м.т.н., ст. преподаватель	20.01.2026	

Научный руководитель

 Смайлов Н.

Задание принял к исполнению обучающаяся

 Байхожаев А.С.

Дата

« 30 » 03 20__ ж

АННОТАЦИЯ

В данной работе исследованы возможности применения волоконно-оптических сенсоров для мониторинга чрезвычайных ситуаций в режиме реального времени и выполнен аналитический обзор принципов их функционирования. Обоснована устойчивость волоконно-оптических сенсоров к тепловым и механическим воздействиям, а также к электромагнитным помехам по сравнению с традиционными сенсорными системами. Предложен концептуальный подход к построению распределённой системы мониторинга с возможностью интеграции в интеллектуальные платформы анализа данных. Полученные результаты подтверждают эффективность использования волоконно-оптических сенсоров в системах раннего обнаружения и локализации чрезвычайных ситуаций.

АНДАТПА

Бұл жұмыста төтенше жағдайларды нақты уақыт режимінде бақылауға арналған талшықты-оптикалық сенсорларды қолдану мүмкіндіктері зерттелді және олардың жұмыс істеу принциптеріне аналитикалық шолу жасалды. Талшықты-оптикалық сенсорлардың жылулық және механикалық әсерлерге, сондай-ақ электромагниттік кедергілерге төзімділігі дәстүрлі сенсорлық жүйелермен салыстырыла отырып негізделді. Ақылды деректерді талдау платформаларымен интеграциялау мүмкіндігі бар таратылған мониторинг жүйесін құрудың тұжырымдамалық тәсілі ұсынылды. Зерттеу нәтижелері төтенше жағдайларды ерте анықтау және локализациялау жүйелерінде талшықты-оптикалық сенсорларды қолданудың тиімділігін растайды.

ABSTRACT

In this work, the potential of fiber-optic sensors for real-time monitoring of emergency situations is investigated, and an analytical review of their operating principles is presented. The robustness of fiber-optic sensors to thermal and mechanical воздействия, as well as to electromagnetic interference, is justified in comparison with conventional sensing systems. A conceptual approach to designing a distributed monitoring system with integration into intelligent data analysis platforms is proposed. The results confirm the effectiveness of using fiber-optic sensors in systems for early detection and localization of emergency events.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Теоретические основы волоконно-оптических датчиков	11
1.1 История развития волоконно-оптических сенсоров	11
1.2 Физические основы распространения света в оптическом волокне	12
1.3 Оптические эффекты, используемые в волоконно-оптических датчиках	13
1.4 Конструкция и типы оптического волокна	14
1.5 Классификация волоконно-оптических датчиков	15
1.6 Методы интеррогации оптических датчиков	16
1.7 Нормативно-техническая база DFOS и ВОД	17
Выводы по разделу 1	17
2 Машинное обучение в волоконно-оптических системах мониторинга	19
2.1 Типология ВОД и физические принципы	19
2.2 Методы интеррогации и мультиплексирования ВОД	21
2.3 Применение ВОД для мониторинга чрезвычайных ситуаций	22
2.4 Технологические тренды и направления развития волоконно-оптического мониторинга	24
2.5 Современные алгоритмы обработки сигналов в распределённых волоконно-оптических системах	25
2.6 Методы повышения точности, помехоустойчивости	28
2.7 Цифровая обработка сигналов и анализ данных в распределённых волоконно-оптических системах	32
2.8 Сравнительный анализ распределённых и локальных волоконно-оптических технологий для мониторинга ЧС	39
Выводы по разделу 2	43
3 Моделирование отклика ВОД с брэгговской решёткой	45
3.1 Моделирование температурного отклика волоконной Брэгговской решетки	45
3.2 Моделирование вибрационного отклика волоконной Брэгговской решетки	49
3.3 Сравнение температурной и вибрационной чувствительности волоконного Брэгговского датчика	54
Выводы по разделу 3	56
4 Архитектура системы мониторинга ЧС на основе DFOS	58
4.1 Общая функциональная схема системы мониторинга ЧС	58
4.2 Принцип работы DFOS системы	59
4.3 Архитектура аналитического сервера и алгоритмы обработки сигналов	60
4.4 Интеграция DFOS с IoT-платформами и цифровыми двойниками	62
4.5 Пример реализации DFOS для мониторинга здания	65

4.6 Практические рекомендации по повышению точности, надёжности и помехоустойчивости DFOS-систем при мониторинге ЧС	67
Выводы по разделу 4	70
Заключение	73
Список использованной литературы	75
Приложение А	77

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие высокотехнологичных систем промышленной и инфраструктурной безопасности обуславливает необходимость организации непрерывного и высокоточного мониторинга потенциально опасных объектов, функционирование которых связано с повышенным риском возникновения аварийных и чрезвычайных ситуаций [1]. К таким объектам относятся магистральные нефте и газопроводы, промышленные и технологические резервуары, транспортные тоннели, мостовые и высотные конструкции, складские комплексы с пожароопасными средами, а также энергетические и инженерные сооружения, подверженные интенсивным тепловым, механическим и вибрационным воздействиям. Нарушение целостности указанных объектов может приводить к техногенным инцидентам, сопровождающимся разрушением несущих конструкций, возгораниями, утечками опасных веществ и существенным ущербом для окружающей среды и безопасности населения.

Традиционные системы контроля, основанные на применении электрических и электронных датчиков температуры, давления и деформации, характеризуются ограниченной помехоустойчивостью, чувствительностью к электромагнитным воздействиям и, как правило, не обеспечивают возможности распределённого мониторинга на протяжённых объектах [2]. Кроме того, эксплуатация таких систем требует развитой кабельной инфраструктуры и регулярного технического обслуживания, что снижает их надёжность в условиях агрессивных сред и экстремальных режимов работы.

В этих условиях распределённые волоконно-оптические системы мониторинга рассматриваются как перспективное направление развития сенсорных технологий, обеспечивающее высокую точность измерений, устойчивость к электромагнитным помехам и возможность непрерывного контроля на расстояниях до десятков километров. Использование оптического волокна в качестве чувствительного элемента позволяет реализовать пространственно распределённое зондирование температурных, деформационных и вибрационных параметров вдоль всей протяжённости контролируемого объекта, что существенно повышает эффективность раннего обнаружения предаварийных и аварийных состояний [3].

Актуальность настоящего исследования также обусловлена необходимостью интеграции распределённых волоконно-оптических сенсорных сетей с современными цифровыми платформами промышленного мониторинга, включая технологии Интернета вещей, системы поддержки принятия решений и концепции цифровых двойников. Такая интеграция обеспечивает переход от простого измерения параметров к интеллектуальной интерпретации данных, прогнозированию развития опасных процессов и формированию обоснованных управленческих решений в режиме реального времени.

Целью данного исследования является исследование и обоснование эффективности применения распределённых волоконно-оптических датчиков в системах мониторинга чрезвычайных ситуаций, а также разработка рекомендаций по построению оптимальной архитектуры сенсорной сети и принципам её интеграции в интеллектуальные платформы промышленной и инфраструктурной безопасности.

Объектом исследования являются системы распределённого волоконно-оптического мониторинга, предназначенные для контроля состояния протяжённых и локальных объектов критической и промышленной инфраструктуры.

Предметом исследования являются методы интеррогации и мультиплексирования сигналов волоконно-оптических датчиков, алгоритмы цифровой обработки измерительных данных, а также чувствительные и метрологические характеристики распределённых сенсорных систем при воздействии температурных, механических и вибрационных факторов.

В работе применяются **методы научного исследования**, включающие анализ и обобщение современных научных источников, математическое и численно-аналитическое моделирование физических процессов в оптическом волокне, методы цифровой фильтрации и подавления шумов, статистическую обработку экспериментальных данных, а также методы машинного обучения и нейросетевые подходы для выделения информативных признаков и детектирования событий в распределённых волоконно-оптических системах.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии моделей функционирования распределённых волоконно-оптических сенсорных сетей с учётом влияния экстремальных эксплуатационных факторов, а также в обосновании принципов повышения точности измерений, пространственного разрешения и помехоустойчивости систем распределённого волоконно-оптического мониторинга.

Научная новизна работы состоит в обосновании применения распределённых волоконно-оптических датчиков в составе интеллектуальной платформы мониторинга чрезвычайных ситуаций, разработке структурной модели сенсорной сети, ориентированной на условия повышенных тепловых, механических и вибрационных воздействий, а также в интеграции методов машинного обучения и нейросетевых алгоритмов для повышения достоверности и оперативности обнаружения аварийных и пожароопасных состояний.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их использования при проектировании и модернизации систем промышленной и инфраструктурной безопасности. Предложенные архитектурные и алгоритмические решения позволяют создавать распределённые системы раннего предупреждения аварий, утечек и деградиационных процессов на объектах нефтегазовой отрасли, транспортной инфраструктуры, энергетических сетях, гидротехнических сооружениях и высотных зданиях, а также интегрировать их в современные киберфизические

и IoT-платформы для автоматизированной диагностики, прогнозирования рисков и визуализации параметров в режиме реального времени.

Апробация работы осуществлялась путём публикации результатов исследования в 1 научном журнале, а также их представления и обсуждения на 1 научно-практической конференции.

1 Теоретические основы волоконно-оптических датчиков

1.1 История развития волоконно-оптических датчиков

Развитие волоконно-оптических датчиков тесно связано с эволюцией оптических волокон, технологий лазерной генерации и методов спектрального анализа. Первые исследования по использованию оптоволокна в качестве чувствительного элемента относятся к началу 1970-х годов, когда были продемонстрированы первые интерферометрические схемы для регистрации изменений показателя преломления под воздействием внешних факторов [4].

Появление одномодовых волокон стандарта SMF (Single-Mode Fiber) в конце 1970-х годов стало ключевым моментом в становлении современной сенсорики. Именно тогда оптическое волокно впервые стало рассматриваться не только как транспортная среда, но и как потенциальный источник информации о состоянии окружающей среды [5].

В 1980-х годах были разработаны первые прототипы интерферометрических датчиков для измерения давления, вибраций и температуры. Однако их практическое применение ограничивалось высокой чувствительностью к шумам и сложностью юстировки. Прорыв произошёл в начале 1990-х годов с развитием технологии записи брэгговских решёток в сердцевине волокна, что позволило получать стабильные локальные отражающие структуры с высокой спектральной селективностью [6, 7].

В 2000-х годах начался активный рост распределённых систем на основе эффектов Rayleigh, Brillouin и Raman. Стали появляться первые коммерческие интеррогаторы OTDR/OFDR (OTDR – Optical Time Domain Reflectometer / OFDR – Optical Frequency Domain Reflectometer), позволяющие регистрировать пространственно распределённые изменения температуры, деформации и акустических воздействий на десятках километров оптоволокна [8].

Современный этап развития (2020–2025 гг.) характеризуется:

- повышением пространственного разрешения DAS/DTS/DSS (DAS – Distributed Acousting Sensing, DTS – Distributed Temperature Sensing, DSS – Distributed Strain Sensing) - систем до 10–20 см;
- уменьшением уровня шумов за счёт цифровой обработки сигналов;
- интеграцией с методами машинного обучения и нейросетей;
- объединением распределённых и точечных датчиков в гибридные сенсорные сети;
- применением DFOS (DFOS – Distributed Fiber-Optic Sensing) в составе цифровых двойников инженерных объектов [1, 3].

Таким образом, историческое развитие волоконно-оптических сенсоров представляет собой переход от отдельных экспериментальных элементов к масштабируемым распределённым системам, способным выполнять детальный мониторинг объектов критически важной инфраструктуры.

1.2 Физические основы распространения света в оптическом волокне

Оптическое волокно представляет собой диэлектрический волновод, обеспечивающий направленное распространение электромагнитной волны в диапазоне длин волн 1300–1650 нм. Основой работы волоконно-оптических датчиков является зависимость параметров светового поля от температуры, механических воздействий и изменений показателя преломления сердцевины.

1.2.1 Волноводное уравнение и эффективный показатель преломления

Электромагнитное поле в цилиндрическом волоконном волноводе описывается решением уравнения Гельмгольца:

$$\nabla^2 E + k^2 n^2(r) E = 0, \quad (1.1)$$

где: E – напряжённость электрического поля;
 $n^2(r)$ – распределение показателя преломления;
 $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Для одномодового волокна решение сводится к характеристике эффективного показателя преломления n_{eff} , зависящего от параметров волокна:

$$\beta = k n_{\text{eff}}, \quad (1.2)$$

где: β – постоянная распространения.

Любое воздействие на волокно – температура ΔT , деформация ε – приводит к вариации n_{eff} и, как следствие, фазовому сдвигу:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}}. \quad (1.3)$$

1.2.2 Температурные и механические зависимости

Изменение эффективного показателя преломления определяется:

- термооптическим эффектом:

$$\frac{dn}{dT} \approx (8 - 10) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \quad (1.4)$$

- коэффициентом линейного теплового расширения кварца:

$$\alpha \approx 0.55 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \quad (1.5)$$

- фотоупругим эффектом, связывающим деформацию и изменение оптической плотности:

$$\Delta n = -\frac{n^3}{2} (p_{11} - p_{12}) \varepsilon, \quad (1.6)$$

где: p_{11} и p_{12} – фотоупругие коэффициенты материала.

Эти зависимости лежат в основе чувствительности DFOS и FBG-датчиков к температуре, вибрациям и статическим деформациям. [5]

1.3 Оптические эффекты, используемые в волоконно-оптических датчиках

Оптическое волокно является средой, в которой распространяющийся свет взаимодействует с неоднородностями структуры, тепловыми флуктуациями, акустическими фононами и периодическими изменениями показателя преломления. Это приводит к ряду физических эффектов, которые используются в качестве механизмов сенсорного преобразования.

Rayleigh-рассеяние. Rayleigh-рассеяние возникает вследствие микроскопических флуктуаций плотности стекла. Является упругим: частота света сохраняется.

Интенсивность обратнорассеянного сигнала описывается законом:

$$I_R \sim \frac{1}{\lambda^4}. \quad (1.7)$$

Малейшие изменения n_{eff} вызывают фазовый сдвиг:

$$\Delta\phi_R = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}} L. \quad (1.8)$$

Это делает Rayleigh-эффект высокочувствительным к вибрациям, акустическим колебаниям и микроизменениям деформации [9].

Brillouin-рассеяние. Brillouin-рассеяние – неупругое взаимодействие света с акустическими фононами. Частота рассеянного сигнала смещается на величину:

$$\Delta\nu_B = \frac{2nV_A}{\lambda}, \quad (1.9)$$

где: V_A – скорость звука в волокне.

Сдвиг $\Delta\nu_B$ линейно связан с температурой и деформацией:

$$\Delta\nu_B = C_\varepsilon \varepsilon + C_T \Delta T. \quad (1.10)$$

Поэтому Brillouin-эффект является основой распределённого измерения деформации и температуры [8].

Raman-рассеяние. Raman-эффект связан с неупругим взаимодействием света и тепловых вибраций решётки стекла. Важно соотношение Stokes/Anti-Stokes-компонент:

$$\frac{I_{AS}}{I_S} = \exp \left(- \frac{h\Omega}{k_B T} \right), \quad (1.11)$$

где Ω – частота колебаний молекулярной решётки.

Это позволяет определять распределённую температуру вдоль волокна [8].

Bragg-отражение. FBG – периодическая модуляция показателя преломления сердцевины. Условие Брэгга:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1.12)$$

где Λ – период решётки.

Любое воздействие ΔT или ε вызывает спектральный сдвиг:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(\alpha + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn}{dT} \right) \Delta T + (1 - p_e) \lambda_B \varepsilon. \quad (1.13)$$

Это даёт чрезвычайно высокую точность локальных измерений [11].

1.4 Конструкция и типы оптического волокна

Конструкция волокна определяет чувствительность сенсорной системы. Основные типы:

- Стандартное одномодовое волокно (SMF-28)
- низкие потери (0.18–0.25 дБ/км);
- высокая стабильность;
- подходит для большинства DFOS-систем [5].

Высокочувствительное волокно с модифицированным профилем используется в задачах обнаружения малых деформаций.

Волокно с пониженной жёсткостью оболочки повышает чувствительность к изгибам и механическим воздействиям.

Специализированные волокна (PCF – photonic crystal fiber).

Имеют микрорячеистую структуру, что улучшает чувствительность к давлению и температуре [10].

1.5 Классификация волоконно-оптических датчиков

Волоконно-оптические датчики классифицируются по физическому принципу действия, типу измеряемой величины и характеру пространственного распределения чувствительных элементов, что позволяет систематизировать их применение в системах мониторинга различного уровня сложности и протяжённости.

С точки зрения физического принципа функционирования выделяют датчики на основе волоконных брэгговских решёток (FBG), интерферометрические сенсоры, а также распределённые системы, использующие эффекты рассеяния Rayleigh, Brillouin и Raman. FBG-датчики обеспечивают высокоточную регистрацию локальных изменений температуры и деформации за счёт смещения резонансной длины волны, интерферометрические датчики основаны на анализе фазовых сдвигов оптического сигнала и применяются в задачах высокочувствительного измерения вибраций и акустических воздействий. Распределённые сенсорные системы на основе эффектов Rayleigh, Brillouin и Raman позволяют реализовать непрерывное зондирование параметров вдоль всей длины оптического волокна, обеспечивая пространственно распределённый контроль температуры, деформации и акустических сигналов на протяжённых объектах.

По типу измеряемой физической величины волоконно-оптические датчики применяются для регистрации температурных и деформационных воздействий, вибраций, давления, линейных и угловых смещений, а также распространения акустических волн. Такая универсальность обуславливает их широкое использование в задачах мониторинга инженерных сооружений, трубопроводных систем, энергетической инфраструктуры и объектов с повышенными требованиями к точности и помехоустойчивости измерений.

По характеру пространственного распределения чувствительных элементов различают точечные, квазираспределённые и полностью распределённые системы. Точечные датчики, как правило реализованные на основе FBG, обеспечивают измерение параметров в строго заданных локальных точках. Квазираспределённые системы используют методы мультиплексирования по длине волны (WDM — Wavelength Division Multiplexing) и по времени (TDM — Time Division Multiplexing), что позволяет объединять множество чувствительных элементов в рамках одной волоконной линии. Полностью распределённые системы, включая технологии DTS (Distributed Temperature Sensing), DAS (Distributed Acoustic Sensing) и DSS (Distributed Strain Sensing), обеспечивают непрерывный контроль параметров вдоль всей протяжённости волокна и являются наиболее перспективными для мониторинга протяжённых объектов критической инфраструктуры в режиме реального времени.

По физическому принципу:

- FBG-датчики;

- Интерферометрические;
- Rayleigh-распределённые;
- Brillouin-распределённые;
- Raman-распределённые.

По типу измеряемой величины:

- Температура;
- Деформация;
- Вибрации;
- Давление;
- Смещения;
- Акустические волны.

По характеру распределения:

- точечные (FBG);
- квазираспределённые (WDM – Wavelength Division Multiplexing, TDM – Time Division Multiplexing);
- полностью распределённые (DTS – Distributed Temperature Sensing, DAS – Distributed Acoustic Sensing, DSS – Distributed Strain Sensing).

1.6 Методы интеррогации оптических датчиков

Интеррогация оптических датчиков, в частности волоконно-оптических брэгговских решёток (FBG), представляет собой ключевой этап в процессе преобразования оптической информации в измеряемые физические параметры. Наиболее распространённым методом является спектральная интеррогация, основанная на регистрации смещения длины волны брэгговского отражения под воздействием внешних факторов, таких как деформация или температура. В данном подходе используются оптические спектроанализаторы (OSA) либо тюнировые лазерные источники, которые позволяют определять положение брэгговского пика с высокой точностью, достигающей 1–3 пм, что обеспечивает высокую чувствительность измерений и стабильность мониторинга параметров [12].

Другим широко применяемым подходом является отражательная временная интеррогация (OTDR – Optical Time Domain Reflectometer), которая основывается на анализе временной задержки отражённых или рассеянных оптических импульсов вдоль волоконного канала. Данный метод позволяет определять пространственное положение датчиков и зон рассеяния, обеспечивая возможность распределённого мониторинга протяжённых объектов, таких как трубопроводы, мостовые конструкции и инженерные коммуникации.

Высокое пространственное разрешение достигается при использовании частотной интеррогации, основанной на анализе частотного сдвига отражённого сигнала в результате когерентного сканирования источника излучения. Этот метод обеспечивает разрешающую способность на уровне

миллиметров, что делает его особенно эффективным для детального анализа локальных деформаций и микроструктурных изменений в контролируемых объектах [8].

Дополнительно применяется фазочувствительная интеррогация, в которой используются интерферометрические схемы, такие как интерферометры Маха–Цендера, для регистрации малых фазовых сдвигов оптического сигнала. Данный подход отличается высокой чувствительностью к динамическим воздействиям, включая вибрации и акустические колебания, что расширяет область применения волоконно-оптических датчиков в задачах структурного мониторинга и системах промышленной безопасности.

- Спектральная интеррогация

Использует OSA или тюнинг-лазеры. Позволяет измерять положение брэгговского пика с точностью до 1–3 пм [12].

- Отражательная временная интеррогация (OTDR – Optical Time Domain Reflectometer)

Определяет положение рассеяния по задержке импульса.

- Частотная интеррогация.

Обеспечивает высокое пространственное разрешение (~мм) [8].

- Фазочувствительная интеррогация

Использует интерферометры Маха–Цендера для регистрации малых фазовых сдвигов.

1.7 Нормативно-техническая база DFOS (Distributed Fiber-Optic Sensing) и волоконно оптических датчиков

Современные системы оптоволоконного мониторинга опираются на международные стандарты:

- ИЕС 61757. Основной стандарт, определяющий параметры и методы испытания волоконно-оптических датчиков.

- ИЕС 61757-1-1 / 1-2 / 2-1. Части стандарта для FBG, Brillouin и Raman-систем [17].

- ГОСТ Р 8.741–2018. Государственный стандарт РФ на метрологию волоконно-оптических датчиков.

- ГОСТ ИЕС 60079

Для объектов с взрывоопасной средой (актуально для нефтегаза).

Стандарты определяют требования к точности, диапазону температур, радиусу изгиба, допустимым нагрузкам и методам калибровки.

Выводы по разделу 1

В рамках раздела 1 были рассмотрены теоретические основы функционирования волоконно-оптических датчиков и распределённых

сенсорных систем, что позволило сформировать целостное представление о физических, технологических и методологических принципах их применения в задачах мониторинга инженерных и критически важных объектов.

Проведённый анализ исторического развития показал эволюцию волоконно-оптической сенсорики от экспериментальных интерферометрических схем к масштабируемым распределённым системам на основе эффектов Rayleigh, Brillouin и Raman, а также к гибридным архитектурам, объединяющим точечные FBG-датчики и протяжённые DFOS-сети. Установлено, что современный этап развития характеризуется интеграцией цифровой обработки сигналов и методов машинного обучения, что существенно повышает точность, устойчивость и информативность измерений в условиях сложных эксплуатационных воздействий.

На основе рассмотрения волноводных уравнений и температурно-деформационных зависимостей показано, что ключевым параметром сенсорного преобразования является вариация эффективного показателя преломления, определяющая фазовые и спектральные сдвиги оптического сигнала. Это обосновывает высокую чувствительность волоконно-оптических датчиков к температуре, механическим нагрузкам, вибрациям и акустическим воздействиям.

Анализ оптических эффектов – Rayleigh-, Brillouin-, Raman-рассеяния и брэгговского отражения – позволил определить области рационального применения соответствующих технологий для локальных и распределённых измерений, а также для мониторинга протяжённых объектов с повышенными требованиями к пространственному разрешению и надёжности диагностики.

Рассмотрение конструктивных типов оптических волокон и классификации сенсорных систем показало, что выбор архитектуры датчика и метода мультиплексирования (WDM/TDM) напрямую влияет на чувствительность, масштабируемость и функциональную гибкость измерительной сети.

В результате сделан вывод, что эффективное применение волоконно-оптических датчиков в системах мониторинга чрезвычайных ситуаций и промышленной безопасности требует комплексного подхода, объединяющего физические принципы сенсорного преобразования, современные методы интеррогации, цифровую обработку сигналов и нормативно-техническое обеспечение. Сформированная теоретическая база служит основой для разработки и обоснования архитектуры практической измерительной системы, рассматриваемой в последующих разделах работы.

2 Машинное обучение в волоконно-оптических системах мониторинга

2.1 Типология волоконно-оптических датчиков и физические принципы

Волоконно-оптические датчики представляют собой класс сенсорных систем, использующих в качестве чувствительного элемента оптическое волокно, в котором изменение внешних воздействий приводит к измеримым вариациям параметров светового сигнала. В зависимости от физического принципа преобразования воздействий в оптическую величину, волоконно-оптические датчики подразделяются на решёточные, распределённые на основе эффектов Rayleigh, Brillouin и Raman, интерферометрические, а также интенсивностные микроперегибные датчики, применяемые в упрощённых конструкциях для пороговой фиксации событий.

Решёточные датчики (FBG – Fiber Bragg Grating) формируются посредством модуляции показателя преломления сердцевины волокна, что приводит к появлению спектрально-избирательного отражения при определённой длине волны. Смещение отражённого пика пропорционально внешнему воздействию, что обеспечивает высокую точность измерения температуры и деформации при компактности чувствительного узла [1, 4, 5]. Применение каскадных FBG-структур на одной оптической линии позволяет реализовать мультиплексированный мониторинг на расстояниях до нескольких километров, что делает данный класс датчиков востребованным для задач локального контроля состояния инженерных объектов.

Распределённые датчики Rayleigh/Brillouin/Raman-типа (DAS – Distributed Acousting Sensing, DTS – Distributed Temperature Sensing, DSS – Distributed Strain Sensing) используют рассеяние оптического импульса вдоль всей длины волокна и позволяют получать непрерывный пространственный профиль температуры, деформации или акустической активности на протяжённых участках до десятков километров [3, 6, 7]. В отличие от FBG, которые дают дискретные точки контроля по длине трассы, распределённые методы формируют аналог «виртуального сенсорного кабеля», способного регистрировать изменения с шагом от 0,5 до 5 метров в зависимости от типа интеррогации и длины импульса.

Таким образом, анализ современной научной литературы показывает, что FBG-датчики (волоконно-оптические брэгговские решётки) являются наиболее целесообразным решением для организации локализованных узловых точек контроля, где требуется высокая точность измерения деформации, температуры и механических напряжений в заранее определённых критических зонах конструкции. Их применение обеспечивает высокую чувствительность, электромагнитную устойчивость и возможность мультиплексирования нескольких датчиков в одном оптическом волокне, что существенно снижает сложность кабельной инфраструктуры и повышает надёжность измерительной системы.

В то же время распределённые системы на основе эффектов Brillouin и Rayleigh ориентированы на непрерывный мониторинг протяжённых объектов повышенного уровня риска, таких как магистральные и технологические трубопроводы, транспортные и инженерные тоннели, мостовые конструкции, а также линии электропередачи и подземные коммуникации. Данные методы позволяют регистрировать пространственное распределение температурных и деформационных параметров по всей длине волоконно-оптической линии с высоким пространственным разрешением, обеспечивая раннее выявление локальных дефектов, утечек, зон перегрева и механических повреждений.

Таблица 2.1 – Основные типы волоконно-оптических датчиков и их оптимальные измеряемые параметры

Тип датчика	Основной измеряемый параметр	Пояснение
FBG	Температура и деформация	Брэгговская решетка сдвигает длину волны отражения при растяжении и нагреве – высокая точность, до 1 пм/°C
Brillouin	Температура и деформация (распределенно)	Сдвиг частоты рассеяния прямо зависит от локальных термомеханических напряжений вдоль волокна
Rayleigh	Вибрации и деформации	Чувствителен к быстрым микровозмущениям фазы света – идеален для регистрации вибрации и акустических колебаний
Raman	Температура	Интенсивность обратнорассеянного света изменяется с тепловым состоянием среды – оптимален для теплового мониторинга
Интерферометрический	Давление, акустика, микродвижения	Микроскопические сдвиги фазы между плечами интерферометра хорошо показывают изменение давления или звука
Интенсивностный (микроперегибный)	Механические воздействия (пороговые)	Реагирует только при определенном изгибе – дешевый вариант для сигнализации или грубых триггеров

2.2 Методы интеррогации и мультиплексирования волоконно-оптических датчиков

Эффективность работы волоконно-оптических датчиков в системах мониторинга чрезвычайных ситуаций во многом определяется не только физическим типом сенсора, но и способом интеррогации – то есть оптического считывания и демодуляции измерительного сигнала. Для решёточных датчиков FBG применяются спектральные методы опроса, основанные на регистрации положения отражённого пика с помощью оптических спектроанализаторов (OSA – Optical Spectrum Analyzer), тюнинговых лазеров или узкополосных фильтров, обеспечивающих определение сдвига рабочей длины волны с разрешением до нескольких пикометров [1, 4]. Такие методы обладают высокой чувствительностью, однако требуют стабильных источников излучения и оптических компонентов с низкими потерями, что особенно критично при мониторинге протяжённых объектов.

Для распределённых DAS/DTS/DSS-систем используется иная группа методов интеррогации, основанная на регистрации рассеянного сигнала вдоль волокна. Наиболее распространёнными являются ф-OTDR [7] (phase-sensitive Optical Time Domain Reflectometry), Brillouin-OTDR/OFDR [6] (Optical Time Domain Reflectometry / Optical Frequency Domain Reflectometry), а также Raman-спектроскопия обратного рассеяния [8]. В отличие от FBG (Fiber Bragg Grating), такие системы не требуют размещения множества решёток, а используют само волокно как непрерывный чувствительный элемент. При этом пространственное разрешение определяется длительностью оптического импульса, а точность восстановления профиля – отношением сигнал/шум (OSNR – Optical Signal-to-Noise Ratio) и эффективностью алгоритма выделения полезного сигнала на фоне шумовых компонентов.

Современные интеррогационные устройства сочетают WDM-мультиплексирование (разделение по длине волны) и TDM-мультиплексирование (разделение по времени импульса), что позволяет увеличивать число измерительных каналов без существенного роста аппаратной сложности системы [3, 9]. Инженерные решения 2023–2025 годов демонстрируют развитие гибридных платформ, способных одновременно опрашивать как FBG-узлы, так и распределённые участки волокна, формируя тем самым гибридную сенсорную сеть смешанной дискретно-непрерывной структуры.

Инженерные решения, представленные в период 2023–2025 годов, демонстрируют устойчивую тенденцию к развитию гибридных платформ интеррогации, способных в едином измерительном контуре одновременно опрашивать как локальные FBG-узлы, так и распределённые участки оптического волокна на основе эффектов Brillouin и Rayleigh. Формируемая при этом гибридная сенсорная сеть смешанной дискретно-непрерывной структуры обеспечивает комплексное представление о состоянии контролируемых объектов, повышает пространственную и временную

согласованность измерений, а также создаёт основу для внедрения интеллектуальных алгоритмов обработки данных и прогнозирования отказов в системах структурного и промышленного мониторинга.

Таблица 2.2 – Сравнительные возможности технологий

Технология	Пространственное разрешение	Диапазон измерений	Время отклика	Тип интеррогации
FBG	1 – 10 см	≤ 2 км	мс	спектральная
Brillouin	0.5 – 1 м	≤ 50 км	с	OTDR/OFDR
Rayleigh	0.1 – 1 м	≤ 40 км	мс	φ-OTDR
Raman	1 – 2 м	≤ 30 км	с	DTS
Интерферометры	–	≤ 1 км	мкс	фазовая

2.3 Применение волоконно-оптических датчиков для мониторинга чрезвычайных ситуаций

2.3.1 Раннее обнаружение перегрева и пожароопасных состояний

Одним из наиболее критичных сценариев развития чрезвычайных ситуаций является локальный перегрев технологических объектов, который может привести к возгоранию, плавлению изоляционных материалов или тепловой деградации оборудования. В складских комплексах, тоннелях, кабельных колодцах, нефтехимических установках и серверных залах температурные аномалии часто возникают задолго до непосредственного воспламенения, поэтому ключевым фактором безопасности является выявление ранних тепловых предвестников аварии [11, 12].

Для этих целей используют волоконно-оптические датчики с брэгговскими решётками, которые представляют собой локальные точки контроля температуры. Принцип их работы основан на смещении длины волны отражённого сигнала при изменении температуры в месте установки решётки. Такой подход позволяет точно фиксировать нагрев отдельных участков оборудования с точностью до десятых долей градуса, что особенно актуально для кабельных трасс, распределительных шкафов и энергетических узлов [4, 5].

При необходимости контроля длинных линейных объектов, таких как транспортные тоннели и протяжённые кабельные каналы, применяется иной подход – распределённое температурное зондирование по эффекту Raman-рассеяния, известное в инженерной практике как DTS (Distributed Temperature Sensing). В этом случае всё оптоволокно используется как непрерывный чувствительный элемент, и температурный профиль восстанавливается по всей длине линии, а не только в отдельных точках, как в случае FBG [8, 10].

Благодаря этому оператор получает тепловую карту всего объекта, что позволяет обнаружить даже локальные зоны перегрева на большом удалении от аппаратного блока без прокладки отдельных датчиков.

2.3.2 Мониторинг утечек и трубопроводных систем

Утечки в магистральных трубопроводах, транспортирующих нефть, газ или химически активные вещества, относятся к числу наиболее опасных аварийных сценариев, поскольку даже малые повреждения стенки трубопровода не всегда сопровождаются заметным изменением давления, и потому не фиксируются традиционными датчиками контроля расхода или давления.

Для решения этой задачи применяются волоконно-оптические системы распределённого акустического мониторинга, работающие на принципе регистрации механических возмущений вдоль линии оптоволоконного кабеля. При возникновении утечки жидкость или газ создаёт характерный акустико-вибрационный фон, который передаётся на оболочку трубопровода и далее – на уложенное вдоль него оптоволоконное волокно. Даже микроскопические изменения механического напряжения волокна вызывают фазовые сдвиги в обратнорассеиваемом оптическом сигнале, которые распознаются системой считывания (интеррогации) [11].

Такой режим регистрации вибрационного сигнала реализуется с использованием технологии распределённого акустического зондирования (DAS – Distributed Acoustic Sensing), когда оптоволоконный кабель выступает аналогом непрерывного датчика акустического поля, способного фиксировать характерные подписи утечки, гидроудара или внешнего механического вмешательства. Это позволяет локализовать возможное повреждение трубопровода по координатам, что особенно важно при обслуживании протяжённых магистралей, расположенных в труднодоступной местности [12].

Таким образом, в отличие от точечных датчиков давления, которые лишь фиксируют факт изменения параметров потока, распределённая акустическая диагностика на оптоволоконном кабеле позволяет выявлять сам момент образования утечки и определять её координаты, что значительно повышает эффективность систем технологической безопасности.

2.3.3 Диагностика структурного состояния инженерных сооружений

Для мостов, тоннелей, опорных конструкций и железобетонных элементов инфраструктуры наиболее значимым фактором риска является развитие микротрещин, неравномерные деформации и снижение несущей способности узлов, которые могут привести к преждевременному выходу объекта из эксплуатационного состояния.

В классических системах мониторинга используются деформационные тензодатчики, устанавливаемые точечно. Однако такой подход не позволяет выявлять распределённые деформационные поля и локальные концентрации напряжений вдоль всей протяжённости объекта. В этой связи получили распространение системы распределённого деформационного мониторинга на оптоволокне, в англоязычной литературе обозначаемые как DFOS – Distributed Fiber Optic Sensing [13, 14].

В таких системах оптоволокно интегрируется в конструкцию сооружения, и каждый его участок становится чувствительным элементом, способным регистрировать растяжение, сжатие или изгиб. В отличие от температурного контроля, где используется Raman-рассеяние, для анализа деформации применяются Brillouin- и Rayleigh-модуляции обратного рассеяния, позволяющие восстанавливать поле механического напряжения по всей длине волокна [15].

FBG-датчики в данном случае используются как локальные «референсные точки», устанавливаемые в зонах максимальной нагрузки – стыках, монтажных швах, опорных опорах мостов. Таким образом, формируется гибридная система мониторинга, объединяющая распределённый контур наблюдения DFOS и локальные узлы контроля на основе FBG, что даёт наиболее полный профиль состояния конструкции и позволяет обнаруживать ранние признаки деградации материала [1, 15].

2.4 Технологические тренды и направления развития волоконно-оптического мониторинга

В исследованиях 2020–2025 годов наблюдается выраженный переход от классических систем с дискретным контролем состояния объекта к концепции непрерывного интеллектуального мониторинга, интегрированного с цифровыми платформами анализа данных. Это проявляется в нескольких устойчивых технологических направлениях, которые формируют будущую архитектуру систем промышленной безопасности [3, 9].

Во-первых, происходит усиление роли распределённых измерительных систем, в которых оптоволокно рассматривается не как линия связи, а как полноценный сенсорный элемент протяжённого типа. Это приводит к росту интереса к Brillouin- и Rayleigh-диагностике высокой разрешающей способности, способной фиксировать небольшие отклонения от нормы до того, как они перерастут в аварийное состояние [1, 15].

Во-вторых, отмечается тенденция к гибридизации сенсорных сетей, когда FBG-датчики используются как точечные маркеры состояния критически нагруженных узлов, а распределённые каналы (DFOS/DTS/DAS) обеспечивают фоновое наблюдение по всей протяжённости объекта. Такой подход позволяет объединять преимущества локальной точности FBG и пространственного охвата распределённых систем, формируя

многомодульные комплексы мониторинга, способные к адаптивной диагностике.

В-третьих, происходит интеграция оптоволоконных систем с цифровыми платформами анализа данных, включая математическое прогнозирование, системы предиктивной аналитики, машинное обучение и цифровые двойники объектов инфраструктуры. Это позволяет превращать волоконно-оптические сенсоры из системы пассивного измерения в активный элемент интеллектуального управления рисками, способный не только фиксировать события, но и прогнозировать развитие отказа по динамике изменения параметров сигнала.[16, 17]

Таким образом, обзор литературы показывает, что волоконно-оптические датчики формируют технологическую основу следующего поколения систем мониторинга чрезвычайных ситуаций. Их ключевое преимущество заключается в сочетании высокой чувствительности, устойчивости к внешним воздействиям и способности к распределённому контролю на значительных расстояниях, что делает их оптимальным базовым инструментом для построения интеллектуальных платформ промышленной безопасности нового поколения.

2.5 Современные алгоритмы обработки сигналов в распределённых волоконно-оптических системах

Современные распределённые волоконно-оптические системы (DAS – Distributed Acoustic Sensing, DTS – Distributed Temperature Sensing, DSS – Distributed Strain Sensing) формируют большие массивы данных, требующие специализированных методов фильтрации, выделения признаков и классификации событий. Эффективная обработка сигнала напрямую определяет точность, скорость реакции и устойчивость системы к шумам. В последние годы (2020–2025 гг.) наблюдается значительный рост интереса к алгоритмам цифровой обработки сигналов (DSP – Digital Signal Processing), методам машинного обучения (ML – Machine Learning) и нейросетевым архитектурам, применяемым для автоматического анализа данных DFOS. [9]

2.5.1 Фильтрация и подавление шумов

Одной из ключевых задач при обработке данных DFOS является подавление шумов, связанных с:

- спекл-флуктуациями Rayleigh-рассеяния;
- дрейфом лазера;
- температурными вариациями;
- нестабильностью источника накачки;
- микроперегибами волокна.

Для этой задачи применяются:

- Вейвлет-фильтрация.

Позволяет локализовать шумы по времени и частоте, сохраняя информативные компоненты вибрации. Используются дискретные вейвлеты Daubechies, Symlet и Coiflet, обеспечивающие хорошую сжимаемость данных.

- Адаптивные фильтры (LMS – Least Mean Squares, RLS – Recursive Least Squares)

Эффективны при компенсации дрейфа сигнала и квазистатических искажений. Они автоматически подстраиваются под изменяющиеся характеристики среды.

- Фазовая стабилизация

Применяется в ф-OTDR (Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometer). Позволяет устранить низкочастотный дрейф и восстановить только полезные высокочастотные возмущения.

- Методы спектрального сглаживания

Используются для DTS-систем, где температурная зависимость проявляется через анти-Стокс компоненту.

Фильтрация является обязательным этапом, поскольку необработанный сигнал DFOS имеет крайне низкое отношение сигнал/шум (SNR – Signal-to-Noise Ratio), что делает невозможным анализ малых событий.

2.5.2 Выделение признаков

После фильтрации сигнал необходимо преобразовать в представление, пригодное для классификации. В DFOS используют следующие методы выделения признаков:

- Спектральные признаки (FFT – Fast Fourier Transform)

Быстрое преобразование Фурье позволяет выделить частотные компоненты, характерные для механических ударов, вибраций, шагов человека, работы насосов и других источников.

- Энергетические признаки

Измеряется энергия сигнала на заданных временных окнах. Подходит для задач обнаружения динамических событий.

- Статистические признаки

Используются для анализа распределений:

- среднее значение;
- дисперсия;
- эксцесс;
- коэффициент асимметрии;
- энтропия сигнала.
- Корреляционные признаки

Позволяют выделять повторяющиеся временные структуры, которые характерны, например, для транспортных нагрузок на мостах или движения поездов.

Благодаря выделению признаков DFOS-системы могут переходить от «сырых» данных к высокоуровневым событиям [7, 16].

2.5.3 Детектирование событий

Алгоритмы детектирования событий устанавливают факт наличия изменений в среде. Применяются следующие подходы:

- Пороговые методы

Используются для DAS в нефтегазовой отрасли. Простой, но эффективный метод, основанный на превышении энергетического порога.

- Методы обнаружения аномалий

Применяются для мониторинга:

- несанкционированных работ,
- вибрации грунта,
- изменений конструкции здания.

Используются алгоритмы: Isolation Forest, One-Class SVM, Local Outlier Factor.

- Скользящие окна

Позволяют локализовать событие по времени и по координате вдоль волокна.

- Кросс-корреляционный анализ

Помогает определить направление и скорость распространения вибрации, что важно при мониторинге трубопроводов.

2.5.4 Машинное обучение и нейросети

С 2020 года вышло множество работ, предлагающих ML-модели для анализа DFOS-сигналов.

Основные направления:

Сверточные нейронные сети (CNN – Convolutional Neural Network)

Используются для классификации событий по характерным временным паттернам.

Например:

- шаги человека;
- работа техники;
- утечки;
- удары;
- движение транспорта.

Сверточные нейронные сети хорошо обрабатывают двумерные представления сигнала: спектрограммы, карты корреляций.

1 Рекуррентные нейронные сети (LSTM – Long Short-Term Memory, GRU – Gated Recurrent Unit)

Эффективны при анализе:

- температурных трендов,
- сейсмоакустических последовательностей,
- динамики давления.

2 Автоэнкодеры

Используются для обнаружения аномалий в длинных временных рядах.

3 Гибридные сети (CNN + LSTM)

Обрабатывают одновременно:

- локальные особенности (через CNN),
- временные зависимости (через LSTM).

Это наиболее мощный инструмент для сложных задач, например: прогноз деформации конструкции или раннее обнаружение утечки. [16, 17]

2.5.5 Методы интеграции DFOS в цифровые платформы

Современные подходы предусматривают обработку данных DFOS в режиме:

- edge-computing – анализ прямо на интеррогаторе;
- fog-computing – распределённая обработка между локальными узлами;
- cloud-computing – анализ больших потоков данных в облаке.

Методы включают:

- потоковую обработку данных;
- автоматическое обнаружение паттернов;
- хранение временных рядов;
- интеграцию с системами SCADA и Digital Twin.

Таким образом, алгоритмы DSP, ML и нейросети позволяют DFOS-системам:

- уменьшать уровень шумов,
- лучше классифицировать типы событий,
- повышать надёжность обнаружения,
- предсказывать будущие аномалии,
- интегрироваться в цифровые двойники и SCADA.

2.6 Методы повышения точности, помехоустойчивости и стабильности измерений в волоконно-оптических датчиках для мониторинга чрезвычайных ситуаций

В системах мониторинга чрезвычайных ситуаций основными требованиями являются высокая точность, устойчивость к шумам, долговременная стабильность, а также возможность обеспечения корректной работы в условиях повышенных температур, вибраций, динамических нагрузок и электромагнитных воздействий. В связи с этим современные волоконно-оптические датчики, включая распределённые системы (DAS,

DTS, DSS) и локализованные решёточные датчики (FBG), оснащаются комплексом методов, направленных на улучшение метрологических характеристик сенсорных каналов.

2.6.1 Оптимизация источников излучения и схем зондирования

На точность DFOS-измерений значительное влияние оказывают параметры зондирующих импульсов. Для повышения разрешающей способности и стабильности применяются:

- Узкополосные лазерные источники с высокой когерентностью, обеспечивающие минимальный уровень фазового шума при ϕ -OTDR и DAS.
- Регулируемая мощность импульсов, позволяющая снижать нелинейные эффекты (SBS – Stimulated Brillouin Scattering, SPM – Self-Phase Modulation) и обеспечивать баланс между дальностью и шумами.
- Использование аperiodических или псевдослучайных зондирующих последовательностей (например, Golay-кодов), что повышает отношение сигнал/шум и снижает уровень кросс-корреляций.

Такая оптимизация особенно критична для раннего обнаружения вибрационных событий (утечки, подвижки грунта, перегрузки конструкций), характерных для инфраструктурных чрезвычайных ситуаций. [8. 9].

2.6.2 Методы цифровой фильтрации и подавления шумов

В распределённых системах ключевым фактором является подавление шумов Релеевских и Рамановских рассеянных сигналов. В современных системах применяют:

- Адаптивные фильтры LMS и RLS (LMS – Least Mean Squares, RLS – Recursive Least Squares), которые автоматически подстраиваются под изменяющийся спектр помех в реальном времени.
- Вейвлет-фильтрацию для выделения слабых событий на фоне низкочастотных структурных шумов.
- Цифровую компенсацию дрейфа фазы, необходимую для ϕ -OTDR, где точность определяется стабильностью фазового фронта.
- Спектральное выделение признаков (FFT – Fast Fourier Transform, STFT – Short-Time Fourier Transform), что позволяет отделять сейсмические признаки от техногенных вибраций.

Эти методы позволяют эффективно извлекать и анализировать слабые информативные сигналы, характерные для начальных этапов развития аварийных и предаварийных состояний, таких как микроутечки газа и жидкостей, зарождение и рост микротрещин, а также малые деформационные и сдвиговые процессы в конструктивных элементах инженерных сооружений. Высокая чувствительность интеррогационных систем в сочетании с пространственно-временной локализацией измерений обеспечивает

возможность раннего обнаружения аномалий и их точной привязки к координатам контролируемого объекта.

Дополнительно применение современных алгоритмов цифровой обработки сигналов и методов машинного обучения позволяет фильтровать шумовые компоненты, классифицировать типы возмущений и прогнозировать дальнейшее развитие дефектов, что существенно повышает достоверность диагностических выводов. В результате формируется проактивная стратегия технического мониторинга, ориентированная не только на фиксацию уже произошедших отказов, но и на предотвращение аварийных ситуаций, снижение эксплуатационных рисков и повышение уровня промышленной и экологической безопасности критически важных инфраструктурных объектов.

2.6.3 Температурная компенсация и контроль механических напряжений

Поскольку системы чрезвычайных ситуаций работают при больших перепадах температур, требуется компенсация температурных дрейфов. Применяются методы:

- FBG-пары с температурной и механической чувствительностью, где изменение длин волн решёток позволяет отдельно определять деформацию и температуру.
- Алгоритмы температурного рекалибрования в DTS, обеспечивающие стабильность данных на дальних участках волокна.
- Механическая развязка интерферометрических датчиков, снижающая ложные сигналы от вибраций, не относящихся к аварийным процессам.

Такая компенсация существенно повышает надёжность мониторинга в нефтегазовых промыслах, шахтах, тоннелях и тепловых сетях. [11, 12]

2.6.4 Стабилизация интерферометрических конфигураций

В системах, основанных на интерференции (Mach–Zehnder, Michelson, Sagnac), точность определяется стабильностью длин оптических плеч. Для повышения устойчивости применяются:

- Волокна с низкой чувствительностью к температуре (например, волокна с пониженным коэффициентом теплового расширения).
- Активная стабилизация длины хода с использованием пьезоконтроллеров.
- Интеграция интерферометрических схем в защищённые модули, минимизирующие влияние внешних вибраций.

Подобные решения применяются в системах мониторинга мостов, зданий и геодинамических объектов. [4]

2.6.5 Машинное обучение для повышения точности классификации событий

ML-модули являются одной из ключевых частей современных DFOS-систем, обеспечивая устойчивую классификацию аварийных событий:

- CNN (CNN – Convolutional Neural Network) – для выделения пространственных паттернов в DAS-сигнале.
- LSTM/GRU (LSTM – Long Short-Term Memory, GRU – Gated Recurrent Unit) – для анализа временных зависимостей, характерных для длительных деформационных процессов.
- Гибридные CNN+LSTM – обеспечивают высокую точность распознавания сложных событий, таких как последовательные механические нагрузки, распространение трещин, подземные колебания.

ML-подсистема повышает помехоустойчивость, поскольку способна выделять именно аварийные признаки на фоне интенсивного техногенного шума.

2.6.6 Применение структурированных кабельных линий и защитных оболочек

Для эксплуатации в ЧС-условиях кабельные линии должны обеспечивать:

- устойчивость к высоким температурам;
- защиту от влаги и коррозии;
- минимальную вероятность механических повреждений.

Применяются:

- бронекабели с гофрированной стальной оболочкой – для промышленности и шахт;
- кабели с двойной полимерной оболочкой – для предотвращения водопоглощения;
- ARM-конструкции (armored fiber) для объектов повышенной вибрации.

Корректная подборка кабеля напрямую влияет на уровень шума, стабильность фазового отклика и долговечность DFOS-системы.

Раздел обосновывает необходимость применения комплексных мер – от оптимизации источника и цифровой обработки до ML-классификации и температурной компенсации. Эти решения позволяют поддерживать высокую точность, стабильность и достоверность данных в условиях, характерных для ЧС-мониторинга.

Раздел обосновывает необходимость применения комплексных мер — от оптимизации источника излучения и методов цифровой обработки сигналов до использования алгоритмов ML-классификации и температурной компенсации. Эти решения позволяют поддерживать высокую точность, стабильность и достоверность данных в условиях, характерных для ЧС-

мониторинга, а также обеспечивают адаптивность измерительной системы к изменяющимся внешним воздействиям и масштабируемость при расширении сенсорной сети и увеличении числа контролируемых объектов.

2.7 Цифровая обработка сигналов и анализ данных в распределённых волоконно-оптических системах

Эффективность распределённых волоконно-оптических систем мониторинга чрезвычайных ситуаций определяется не только физическими принципами формирования и распространения оптического отклика, но и качеством многоуровневой цифровой обработки сигналов, обеспечивающей преобразование первичных измерительных данных в достоверную диагностическую информацию. Сигналы, получаемые методами ϕ -OTDR, DAS (Distributed Acoustic Sensing), DTS (Distributed Temperature Sensing) и другими распределёнными технологиями, представляют собой большие массивы временных и пространственно-коррелированных последовательностей с высокой вариативностью, наличием аддитивного и структурированного шума, а также сложной частотно-временной и спектральной структурой, обусловленной многолучевым распространением, нелинейными эффектами и внешними возмущениями.

В этих условиях цифровая обработка играет ключевую роль в повышении метрологической точности и пространственного разрешения измерений, обеспечении устойчивости к помехам и дрейфу параметров источника излучения, а также в выделении информативных признаков для последующего анализа. Применение адаптивных фильтров, вейвлет-преобразований, методов спектрального и корреляционного анализа позволяет эффективно разделять полезные сигнальные компоненты и фоновые флуктуации.

Дополнительно интеграция методов машинного обучения и интеллектуальной классификации обеспечивает автоматическое распознавание типов событий, таких как утечки, механические воздействия, вибрации, температурные аномалии и попытки несанкционированного вмешательства. Это формирует основу для построения предиктивных и проактивных систем мониторинга, ориентированных на раннее предупреждение, снижение эксплуатационных рисков и повышение уровня промышленной, экологической и инфраструктурной безопасности протяжённых и критически важных объектов.

Дополнительно следует отметить, что внедрение потоковой обработки данных в реальном времени и облачных вычислительных платформ позволяет масштабировать системы мониторинга, обеспечивать централизованное хранение и анализ измерительной информации, а также интегрировать результаты диагностики в корпоративные системы управления безопасностью и принятия решений.

Таблица 2.3 – Методы цифровой обработки и повышения качества сигналов в распределенных волоконно-оптических системах

Метод	Суть метода	Улучшение параметра
Оптимизация источника излучения	Использование узкополосных лазеров, импульсов с контролируемой мощностью, кодовых последовательностей (Golay, PRBS)	Повышение SNR, снижение фазового шума, увеличение дальности измерений
Адаптивная цифровая фильтрация (LMS, RLS)	Подстройка фильтров под текущий спектр помех, динамическая компенсация шумов	Снижение влияния низкочастотных и техногенных вибраций, повышение точности выделения событий
Вейвлет-фильтрация и FFT-анализ	Разложение сигнала на частотные компоненты, выделение слабых событий	Улучшение чувствительности к ранним признакам аварий, выделение микросигналов
Температурная компенсация (FBG-пары, алгоритмы DTS-калибровки)	Раздельное измерение деформаций и температуры, коррекция дрейфа	Стабильность данных при перепадах температуры, повышение точности деформационных измерений
Стабилизация интерферометрических схем	Защищённые модули, контролируемая длина плеч, низкотемпературные волокна	Уменьшение фазовых ошибок и ложных срабатываний
ML-классификация (CNN, LSTM, гибриды)	Обучение сетей распознавать паттерны событий, фильтрация ложных сигналов	Повышение точности обнаружения аварий, снижение количества ложных тревог
Использование защитных кабельных конструкций	Бронекабели, влагозащита, виброустойчивые оболочки	Стабильность сигнала, уменьшение механических шумов и деградации

2.7.1 Предварительная обработка сигналов и повышение отношения сигнал/шум

Первым этапом цифровой обработки является стабилизация полученных временных рядов и подавление помех. Сырые DFOS-сигналы содержат

оптические шумы, фазовые флуктуации, температурные дрейфы и паразитные механические воздействия. Для их подавления применяются:

- линейные фильтры (низкочастотные, полосовые, медианные);
- адаптивные алгоритмы LMS и RLS (LMS – Least Mean Squares, RLS – Recursive Least Squares), подстраивающиеся к текущим статистическим характеристикам шума;
- нормализация амплитуды и корректировка дрейфа базового уровня;
- сегментация данных с выделением стабильных окон для анализа.

Адаптивные фильтры особенно важны в условиях изменчивого фонового воздействия, например, при работе вдоль протяжённых конструкций, где спектр шумов зависит от температуры, вибраций и локальных механических условий. Правильно организованная предварительная обработка обеспечивает формирование устойчивой основы для последующих методов анализа.

2.7.2 Спектрально-временной анализ и преобразование сигнала

После предварительной стабилизации данных и подавления шумов выполняется выделение информативных компонент сигнала с применением методов частотного и временно-частотного анализа. Эти подходы позволяют преобразовать сырые распределённые данные DFOS в форму, удобную для дальнейшего выделения признаков, классификации событий и интерпретации процессов, возникающих вдоль всей длины оптического волокна.

В распределённых волоконно-оптических системах наиболее широко применяются следующие методы спектрально-временного преобразования:

- быстрое преобразование Фурье (FFT) – используется для выделения устойчивых частотных составляющих, характерных для вибраций оборудования, транспортной активности, акустических воздействий и сейсмических микровозмущений;
- коротковременное преобразование Фурье (STFT) – позволяет получать спектрограммы, показывающие изменение спектра сигнала во времени, что делает его ключевым инструментом анализа динамических событий;
- анализ амплитудно-фазовых характеристик рассеянного излучения – применяется в когерентных DFOS-методах, включая ϕ -OTDR, для выделения малых фазовых изменений, связанных с микровибрациями и быстрыми переходными процессами;
- формирование энергетических карт распределённых воздействий – позволяет визуализировать пространственно-временную структуру нагрузки, перемещений или вибраций вдоль оптического волокна.

Особую роль в анализе DFOS-данных играет коротковременное преобразование Фурье. Большинство событий, возникающих при мониторинге чрезвычайных ситуаций и техногенных процессов, имеют ярко

выраженную динамическую природу – изменяются во времени, обладают фазовыми сдвигами, нарастающими или затухающими частотами. STFT обеспечивает построение спектрограмм, позволяющих выявлять:

- кратковременные импульсные события (удары, шаговые нагрузки, транспортные колебания);
- переходные процессы, связанные с резким изменением состояния среды;
- нарастающие вибрации и ранние признаки аварийных ситуаций;
- сложные многокомпонентные акустические и сейсмические воздействия.

Таким образом, спектрально-временное разложение формирует структурированное представление DFOS-сигнала, в котором отражены как частотные особенности, так и их динамика во времени. Такое представление служит основой для последующего выделения признаков, обучения моделей машинного интеллекта и точной интерпретации событий, регистрируемых распределёнными волоконно-оптическими датчиками.

2.7.3 Извлечение информативных признаков и формирование параметрических описаний

На основе спектральных данных и временных рядов формируется набор информативных признаков, который используется для классификации событий. Типовые признаки включают:

- интегральную энергию в частотных диапазонах;
- статистические параметры (среднее, дисперсия, асимметрия, эксцесс);
- коэффициенты корреляции и автокорреляции;
- градиенты амплитуды и фазы;
- параметры текстурности спектрограмм (локальные частотно-временные паттерны).

Для повышения устойчивости признаки могут агрегироваться на нескольких масштабах (временных и пространственных), что позволяет:

- снижать чувствительность к шумам;
- сохранять локальность аварийных событий;
- обеспечивать точное определение координат нарушений вдоль волокна.

Этот этап является мостом между «сырым» сигналом и интеллектуальными моделями анализа.

2.7.4 Применение нейросетевых моделей для классификации и интерпретации событий в распределённых волоконно-оптических датчиках

Применение нейросетевых моделей в распределённых волоконно-оптических системах становится одним из наиболее перспективных направлений обработки больших массивов акустических, температурных и

деформационных данных. В отличие от классических методов цифровой обработки сигналов (FFT, STFT, корреляционный анализ или фильтры Калмана), нейросетевые модели способны не только извлекать скрытые признаки, но и выполнять высокоточное распознавание событий в автоматическом режиме, обеспечивая интеллектуальный уровень анализа измерительной информации.

Современные DFOS-системы генерируют большие объёмы данных, представляющих собой набор пространственно распределённых временных сигналов. Их структура отражает сложные физические процессы, такие как вибрации, шаговые нагрузки, транспортные воздействия, деформации или температурные аномалии. Нейросетевые модели позволяют эффективно выделять характерные паттерны в таких данных и тем самым повышают точность локализации и классификации событий.

Одним из наиболее распространённых подходов являются сверточные нейронные сети (CNN – Convolutional Neural Network), которые хорошо подходят для анализа пространственных распределений Rayleigh-или фазирующих откликов ϕ -OTDR. CNN обеспечивают автоматическое извлечение информативных признаков – спектральных, структурных или амплитудных – без необходимости ручного выбора фильтров или математических преобразований. Благодаря этому такие модели часто применяются в задачах обнаружения вторжений, классификации транспортных движений и анализа акустических профилей.

Для задач, связанных с динамикой сигналов во времени, высокой эффективностью обладают рекуррентные архитектуры, прежде всего LSTM-сети (LSTM – Long Short-Term Memory). Они способны учитывать долгосрочные временные зависимости и выявлять слабые изменения в последовательных DFOS-сигналах, что критически важно для мониторинга медленно развивающихся процессов – оседания грунта, температурных режимов, деформаций трубопроводов, микросейсмических событий и других протяжённых сигналов. LSTM-модели часто используются для прогнозирования состояния и интерпретации длительных временных рядов.

В практических системах мониторинга также применяются гибридные архитектуры CNN+LSTM, которые объединяют сильные стороны обоих подходов: CNN извлекают пространственные/спектральные признаки, а LSTM анализирует их временную динамику. Такой комплексный подход обеспечивает высокую точность классификации и устойчивость к шумам в сложных сценариях.

Помимо глубоких нейронных сетей, в распределенных волоконно-оптических системах сохраняют значение и классические методы машинного обучения, такие как SVM и Random Forest. Они демонстрируют хорошие результаты в задачах классификации событий при наличии заранее подготовленных признаков, извлечённых спектральными или корреляционными методами. Эти алгоритмы используются в реальных

системах, где важно сочетание высокой скорости обработки и интерпретируемости.

Нейросетевые модели успешно дополняют традиционные DSP-подходы, включая FFT (быстрое преобразование Фурье), STFT (короткое Фурье-преобразование), вейвлет-анализ, корреляционные методы и фильтры Калмана. Их совместное применение позволяет формировать гибридные системы анализа данных распределенных волоконно-оптических системах, где нейросети выполняют высокоточную классификацию или интерпретацию событий, а классические методы обеспечивают предварительное фильтрование, подавление шумов и выделение признаков.

Обобщённое сравнительное описание перечисленных методов, включая их принципы работы, преимущества, ограничения и области применения, приведено в таблице 2.4, что обеспечивает прямую согласованность текста раздела с представленными результатами.

Таблица 2.4 – Сравнительный анализ методов обработки и классификации DFOS-сигналов

Метод	Прицип работы	Преимущества	Ограничения	Типичные задачи и события
FFT (быстрое преобразование Фурье)	Разложение сигнала на частотные компоненты	Высокая скорость; хорош для первичного анализа	Не подходит для непостоянных сигналов	Спектральный анализ вибраций DAS
STFT (короткое Фурье-преобразование)	Спектральный анализ в скользящих окнах	Отслеживание изменений во времени	Зависимость результата от размера окна	Динамические воздействия, транспорт
Вейвлет-анализ	Многоуровневая декомпозиция сигнала	Хорошая локализация коротких событий	Высокая вычислительная сложность	Микросейсмика, короткие импульсные события
Корреляционный анализ (Xcorr)	Сравнение сигнала с эталоном	Выявление слабых изменений	Чувствителен к шумам	Обнаружение изменений состояния волокна
Фильтр Калмана	Оптимальная оценка состояния во времени	Устойчивость к шуму, сглаживание	Требует точной модели системы	DTS/DSS – температура, деформации

Продолжение таблицы 2.4

Метод	Прицип работы	Преимущества	Ограничения	Типичные задачи и события
SVM / Random Forest	Классификация по заранее выделенным признакам	Хорошая точность при небольших данных	Требуют ручного извлечения признаков	Классификация событий DAS/DSS
CNN (сверточные сети)	Автоматическое выделение пространственных и спектральных признаков	Высокая точность; не требуют ручных фильтров	Требуют данных для обучения	Выявление вибраций, шагов, вторжений
LSTM / RNN	Анализ временных зависимостей	Отлично работают с последовательностями	Высокая вычислительная нагрузка	Длительные процессы, динамика ЧС
CNN + LSTM (гибрид)	Экстракция пространственных признаков + анализ временной динамики	Максимальная точность и устойчивость	Требует больших данных и GPU	Комплексная классификация событий в DFOS
Когерентная обработка ф-OTDR	Измерение фазовых изменений рассеяния	Высокая чувствительность	Чувствительность к дрейфам	Мониторинг вибраций, охрана периметра

2.7.5 Формирование диагностического решения и обработка неопределённости

На завершающем этапе цифровой обработки выполняется интеграция результатов анализа. Формируется набор параметров, необходимых для мониторинга ЧС:

- тип события;
- координата вдоль волокна;
- интенсивность воздействия;
- длительность и динамика развития;
- вероятность достоверности;
- прогноз дальнейшего изменения сигнала.

Дополнительно выполняются:

- фильтрация ложных тревог;
- объединение событий, возникающих в соседних сегментах волокна;
- статистическое усреднение для повышения устойчивости;
- передача данных в SCADA, центр мониторинга или интеллектуальную платформу управления.

Этот этап превращает сложный набор измерений в структурированную информацию, пригодную для принятия оперативных решений.

Таблица 2.5 – Этапы цифровой обработки сигналов распределенных волоконно-оптических датчиков и их назначение

Этап обработки	Описание	Основные методы	Назначение
Предварительная фильтрация	Стабилизация временных рядов, подавление шумов	LMS, RLS, полосовые фильтры	Повышение SNR, устранение дрейфа
Спектрально-временной анализ	Получение частотно-временных представлений	FFT, STFT	Выявление переходных процессов, спектральных паттернов
Извлечение признаков	Формирование параметров для анализа	статистические признаки, энергии, корреляции	Сжатие информации, подготовка к классификации
Нейросетевой анализ	Автоматическое выделение и классификация	CNN, LSTM, гибридные CNN-LSTM	Определение типа события и его структуры
Формирование решения	Объединение данных и вывод информации	Decision Logic, пороговые модели	Тип события, координата, интенсивность

2.8 Сравнительный анализ распределённых и локальных волоконно-оптических технологий для мониторинга чрезвычайных ситуаций

Волоконно-оптические технологии мониторинга чрезвычайных ситуаций отличаются принципами формирования измерительного сигнала, спектральными характеристиками, чувствительностью, разрешающей способностью и устойчивостью к внешним воздействиям. В практических системах используются как локальные датчики (FBG, Fabry–Perot), так и распределённые системы (φ-OTDR, DAS, DTTS, DSS), каждая из которых

обладает собственной областью наилучшего применения. Сравнительный анализ этих технологий позволяет определить критерии выбора оптимальной измерительной методики для конкретных сценариев мониторинга.

2.8.1 Основные параметры сравнения распределенных волоконно-оптических систем и FBG-систем

При выборе технологии мониторинга учитываются следующие параметры:

- тип измеряемых воздействий;
- пространственное разрешение;
- длина контролируемого участка;
- чувствительность и минимально различимое изменение параметров;
- время отклика и частота дискретизации;
- устойчивость к помехам и внешним факторам;
- динамический диапазон;
- стоимость внедрения и сложность интеграции.

Эти параметры определяют применимость технологий в задачах раннего обнаружения аварий и контроля критически важных объектов.

2.8.2 Сравнение распределённых технологий: ф-OTDR, DAS, DTS, DSS

ф-OTDR (phase-OTDR):

- высокое пространственное разрешение (до 1 м);
- чувствительность к вибрациям и слабым механическим воздействиям;
- подходит для периметров охраны, трубопроводов, мостов;
- требует стабилизированного источника и качественной фильтрации фазовых шумов.

DAS (Distributed Acoustic Sensing):

- воспринимает акустические и вибрационные волны вдоль всей длины волокна;
- подходит для транспортных объектов, строительных конструкций, трубопроводов;
- высокая частота дискретизации;
- чувствительно к внешним механическим шумам и требует развитых алгоритмов классификации.

DTS (Distributed Temperature Sensing)::

- измеряет температурный профиль на основе эффекта Рамана;
- применяется в противопожарных системах, кабельных линиях;
- низкое временное разрешение;
- высокая устойчивость к вибрационным помехам.

DSS (Distributed Strain Sensing):

- контролирует деформации вдоль волокна;

- используется в мостах, зданиях, инженерных сооружениях;
- высокое пространственное разрешение;
- ограниченная частота обновления данных.

2.8.3 Локальные технологии: решётки Брэгга и их преимущества

FBG-датчики характеризуются:

- высокой точностью измерения деформации и температуры;
- устойчивостью к электромагнитным воздействиям;
- возможностью мультиплексирования множества датчиков;
- компактностью и удобством интеграции в конструкцию.

Недостаток – ограниченная зона контроля (точечный или квазираспределённый характер), что делает FBG менее применимыми для протяжённых объектов, но идеальными для локальных узлов и структур.

2.8.4 Выбор технологии под конкретный тип чрезвычайной ситуации

Разные типы ЧС требуют разных подходов:

- Пожарные риски / кабельные трассы → DTS
- Механические повреждения трубопроводов / утечки → DAS / ф-OTDR
- Деформации несущих конструкций → DSS / FBG
- Периметры охраны → ф-OTDR / DAS
- Сейсмический мониторинг → DAS
- Долговременный мониторинг инженерных сооружений → FBG + DSS (комбинированные решения)

Такой подход позволяет оптимизировать точность и надёжность контроля.

2.8.5 Преимущества гибридных DFOS-платформ

Современные системы часто комбинируют несколько технологий для повышения эффективности:

- DAS + DTS → вибрации + температура
- DSS + FBG → распределённая деформация + точные локальные узлы
- ф-OTDR + ML → повышение чувствительности и уменьшение ложных тревог
- FBG-массивы + DAS → структурные элементы + общая виброакустическая среда

Гибридный подход обеспечивает:

- более широкий спектр обнаруживаемых событий,
- устойчивость к внешним факторам,
- высокую точность локальной диагностики,

- улучшенную надёжность мониторинга.

Сравнительный анализ показывает, что каждая волоконно-оптическая технология обладает своей областью эффективности и особенностями применения. Распределённые методы позволяют контролировать большие расстояния и динамические процессы, тогда как FBG-решётки обеспечивают высокоточные локальные измерения. Наибольшую эффективность демонстрируют гибридные системы, объединяющие преимущества нескольких технологий и использующие цифровую обработку сигналов и методы машинного обучения для повышения чувствительности и достоверности диагноза.

Таблица 2.6 – Сравнение основных характеристик волоконно-оптических технологий мониторинга чрезвычайных ситуаций

Параметр	φ-OTDR	DAS	DTS	DSS	FBG
Измеряемый параметр	вибрации, механические воздействия	акустика, вибрации	температура	деформация	температура, деформация, давление
Пространственное разрешение	1–10 м	1–10 м	0,5–3 м	1–2 м	точечное (мм)
Дальность измерений	до 40 км	до 50 км	до 10 км	до 20 км	до десятков метров (в мультиплексе)
Частотные / временные характеристики	высокая частота дискретизации, регистрация слабых вибраций	широкая частотная полоса, стабильность	низкое временное разрешение	средняя частота обновления	высокая частота, высокая стабильность
Чувствительность	высокая	высокая	средняя	высокая	очень высокая
Преимущества	чувствительность к малым воздействиям; обнаружение вибраций на расстоянии	регистрация акустики на больших расстояниях	устойчива к вибрациям и ЭМ-помехам	высокая точность деформационных измерений	точность, мультиплексирование

Продолжение таблицы 2.6

Ограничени я	чувствитель ная к фазовым шумам; требования к источнику	высокая чувствите льность к паразитн ым шумам	не регистр и рует вибраци и	ограниче н ная скорость	точечный характер; малая протяжённос ть
Типичные области применения	периметры, трубопрово ды, мосты	транспор т, трубы, сейсмика	пожарна я безопас ность, кабельн ые линии	мосты, здания	локальные узлы и конструкции

Во второй главе проведён комплексный обзор современных волоконно-оптических технологий, применяемых в системах мониторинга чрезвычайных ситуаций. Рассмотрены физические принципы формирования измерительного сигнала, спектральные и структурные особенности различных типов датчиков, а также методы повышения точности, стабильности и помехоустойчивости при работе в реальных условиях эксплуатации. Особое внимание уделено цифровой обработке данных, включая адаптивную фильтрацию, спектрально-временной анализ и применение нейросетевых моделей для автоматической интерпретации событий.

Проведённый сравнительный анализ распределённых и локальных волоконно-оптических технологий показал, что каждая из них обладает собственной областью эффективного применения и уникальным набором характеристик. Распределённые методы (ф-OTDR, DAS, DTS, DSS) обеспечивают дистанционное обнаружение событий вдоль протяжённых объектов, тогда как FBG-датчики позволяют выполнять высокоточные локальные измерения. Наибольший потенциал демонстрируют гибридные решения, сочетающие преимущества нескольких технологий и использующие современные алгоритмы цифровой обработки. Полученные результаты служат теоретической основой для разработки и моделирования волоконно-оптических датчиков, рассматриваемых в следующей главе.

Выводы по разделу 2

В разделе 2 рассмотрены подходы к применению машинного обучения в волоконно-оптических системах мониторинга чрезвычайных ситуаций, что позволило связать физику формирования оптического отклика с современными методами интеллектуальной обработки данных. Показано, что практическая ценность DFOS-технологий (ф-OTDR, DAS, DTS, DSS) и

решёточных FBG-датчиков определяется не только их метрологическими возможностями, но и архитектурой интеррогации, мультиплексирования и вычислительного контура анализа сигналов.

Установлено, что FBG-датчики являются оптимальным решением для локализованных узловых измерений с высокой точностью температуры и деформации, тогда как распределённые методы Rayleigh/Brillouin/Raman обеспечивают непрерывный контроль протяжённых объектов с пространственной привязкой параметров и возможностью ранней диагностики утечек, перегревов и механических воздействий. Обосновано, что сочетание WDM/TDM-мультиплексирования и развитие гибридных платформ интеррогации (2023–2025 гг.) формируют основу для построения сенсорных сетей смешанной дискретно-непрерывной структуры, повышающих полноту наблюдения и гибкость масштабирования.

Показано, что DFOS-сигналы характеризуются высокой вариативностью, сложной частотно-временной структурой и низким отношением сигнал/шум, вследствие чего цифровая обработка (адаптивная фильтрация, вейвлет-методы, спектрально-временной анализ, корреляционные подходы) является ключевым элементом повышения точности измерений и устойчивости к помехам. Доказана целесообразность использования методов ML для автоматического выделения информативных признаков, детектирования аномалий и классификации событий, включая применение CNN для распознавания паттернов по спектрограммам/картам корреляций, LSTM/GRU для анализа временной динамики и гибридных CNN+LSTM-архитектур для сложных сценариев мониторинга.

Отдельно показано, что повышение достоверности диагностики в условиях ЧС-мониторинга требует комплексных мер — оптимизации источников излучения и схем зондирования, температурной компенсации, стабилизации фазочувствительных конфигураций, выбора защитных кабельных конструкций и внедрения потоковой (edge/fog/cloud) обработки данных. В результате сделан вывод, что наибольший потенциал демонстрируют гибридные DFOS-системы, объединяющие преимущества локальных и распределённых датчиков и использующие DSP+ML как единый интеллектуальный контур, обеспечивающий раннее предупреждение, снижение числа ложных тревог и поддержку принятия решений для критически важных объектов.

3 Моделирование отклика волоконно-оптического датчика с брэгговской решёткой

Современные волоконно-оптические датчики, в особенности FBG-сенсоры, обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям, что делает их перспективными для применения в системах мониторинга чрезвычайных ситуаций. [18, 19] В данной главе выполнено численно-аналитическое моделирование, направленное на исследование отклика FBG-структуры на воздействие температуры и механических вибраций.

Для численного моделирования температурного и вибрационного отклика FBG-датчика использовалась схема, реализованная в программной среде OptiSystem (Рисунок 3.1).

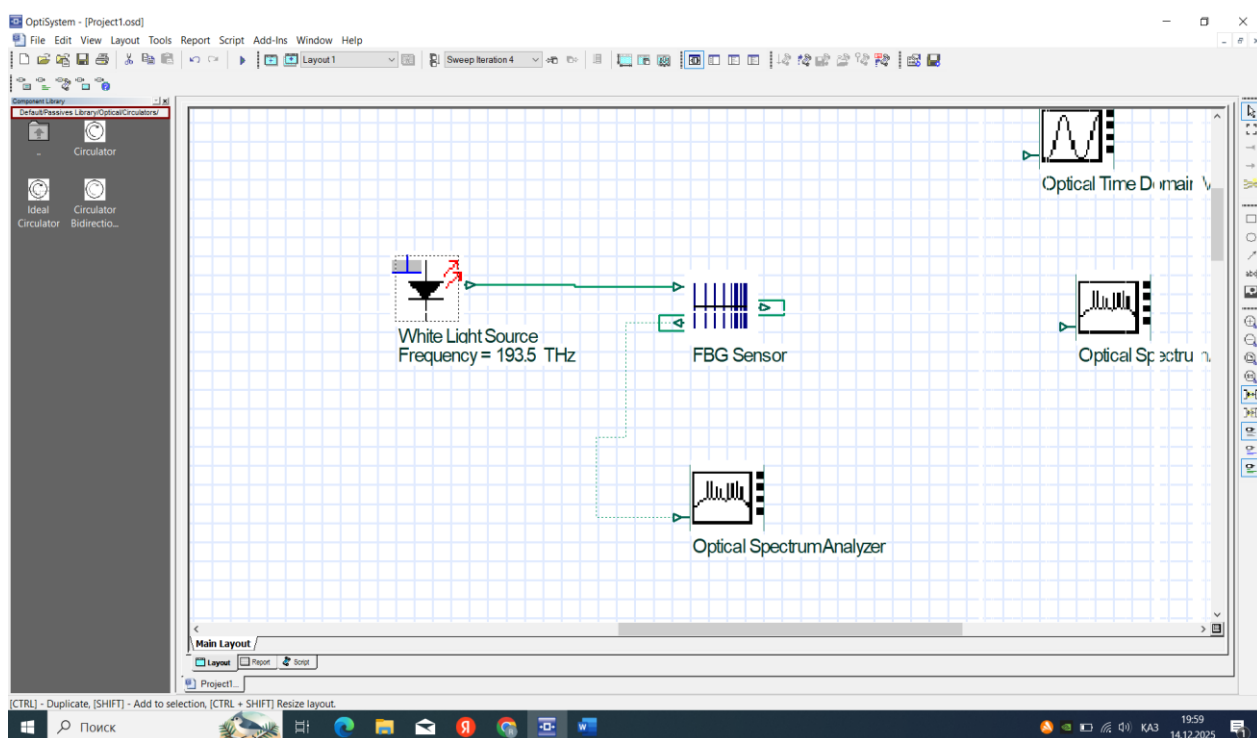


Рисунок 3.1 – Модель FBG-датчика в среде OptiSystem (Источник света – FBG Sensor – оптический спектроанализатор).

3.1 Моделирование температурного отклика волоконной Брэгговской решетки

Исходная длина волны отражения принята равной:

$$\lambda_0 = 1550,000 \text{ нм при } T_0 = 20^\circ\text{C} \quad (3.1)$$

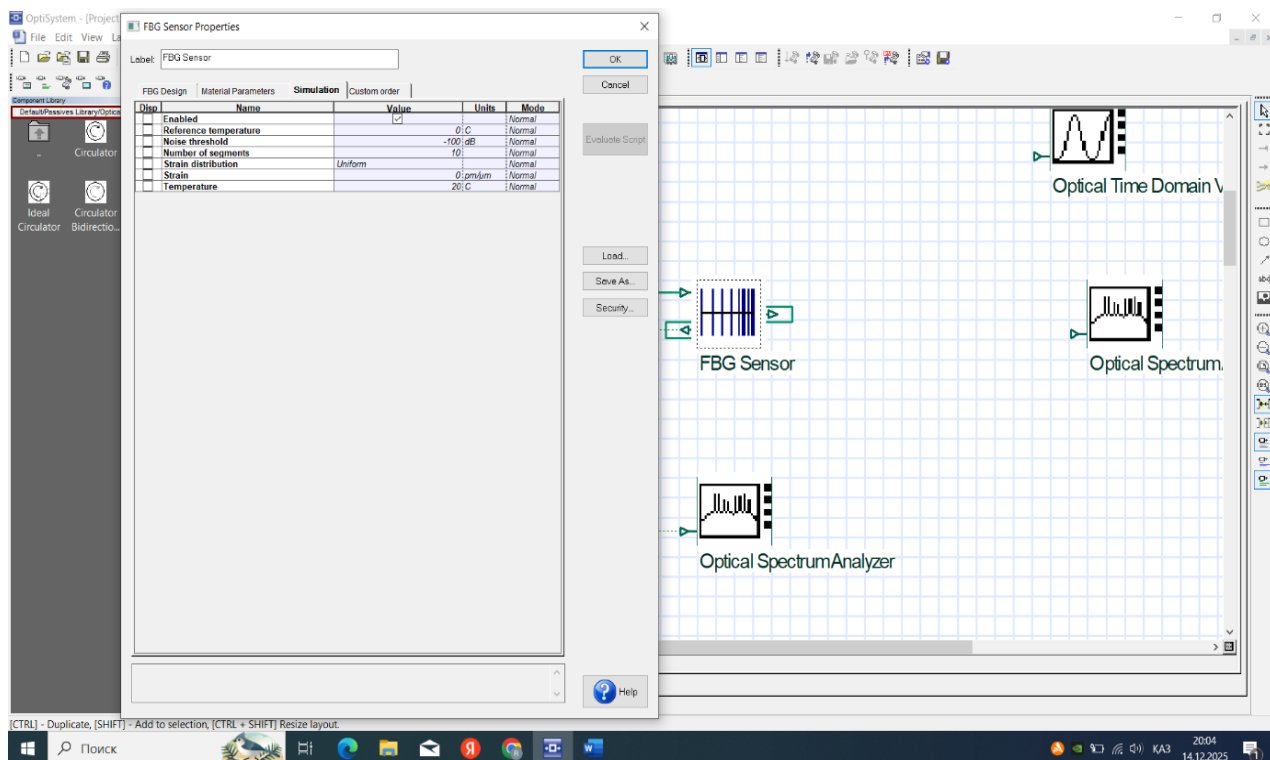


Рисунок 3.2 – Настройки FBG-датчика в среде OptiSystem (на фото видно что температура равна 20°C).

Повышение температуры вызывает спектральный сдвиг за счёт термооптического и теплового расширения [18,19]:

$$\Delta\lambda_T = S_T \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

Чувствительность для FBG принята:

$$S_T \approx 10 \text{ pm/}^\circ\text{C}$$

Диапазон температур: 20–120 °C, шаг 5 °C

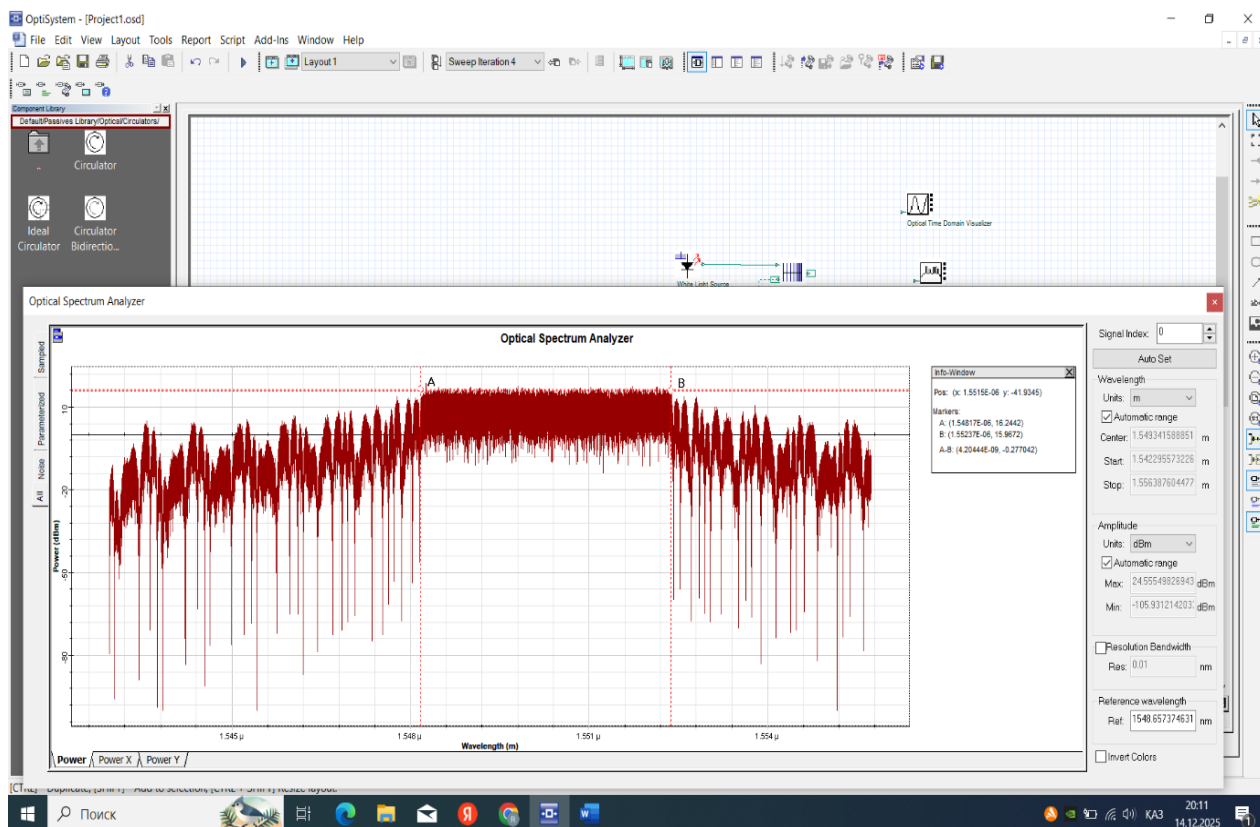


Рисунок 3.3 – Результат моделирования спектра отражения FBG при температуре 20°C

Зафиксируем начало и конец отраженного сигнала маркером А и В, и сравним с результатами воздействия на FBG температурой 40°C. В графике наглядно продемонстрировано как при воздействии температуры на FBG, меняется длина волны отраженного сигнала. (Рисунок 3.3). Далее составим таблицу смещений длин волн, при изменений температуры 20-120°C с шагом 5°C. (Таблица 3.1). На основе этой таблицы можно построить график зависимости длин волн отраженного сигнала FBG от температуры которой на нее воздействует в моменте. (Рисунок 3.4)

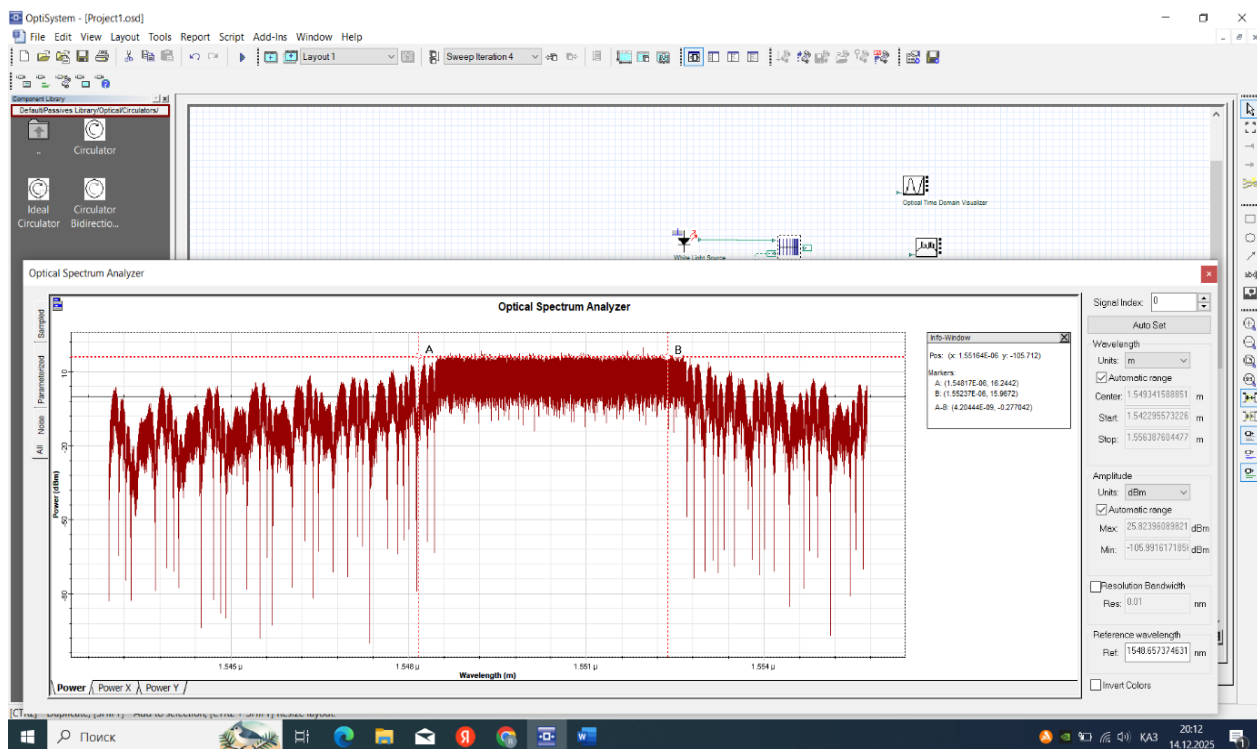


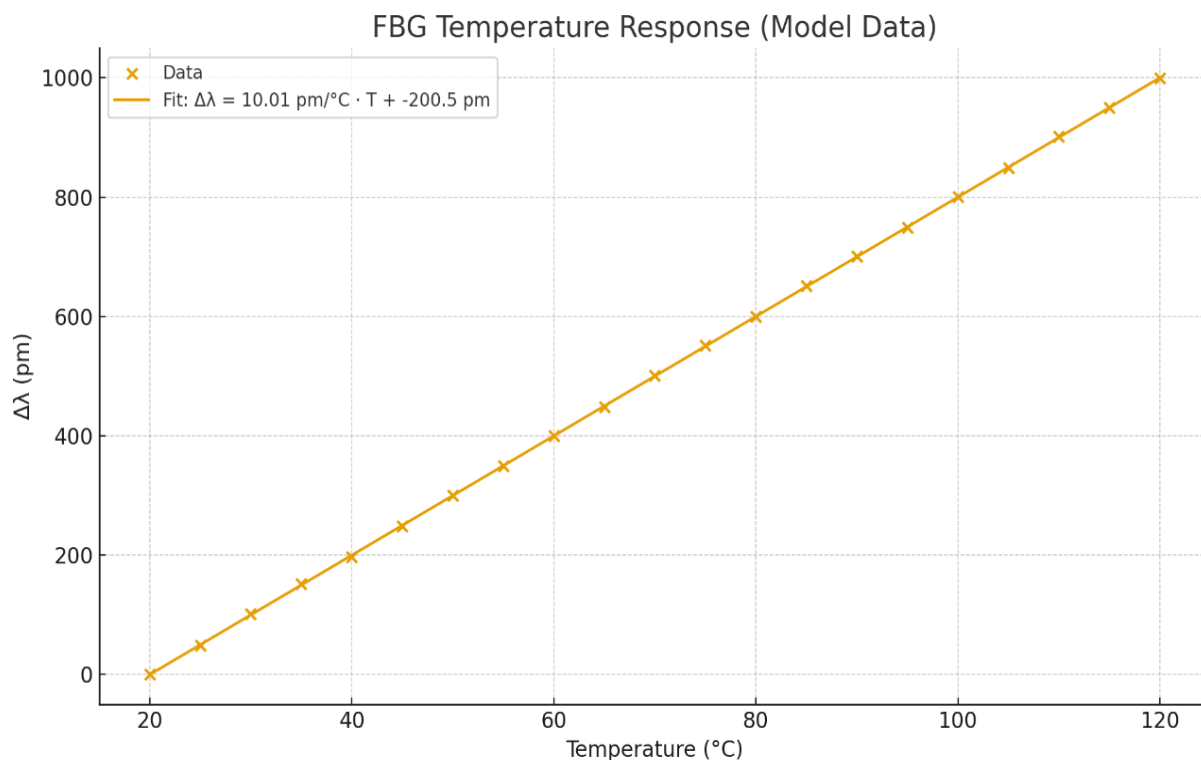
Рисунок 3.4 – Результат моделирования спектра отражения FBG при температуре 40°C (в графике заметно смещение начала и конца сигнала относительно маркеров)

Результаты:

Таблица 3.1 – Смещение длины волны FBG при изменении температуры

Температура (°C)	DeltaLambda (pm)	Lambda (nm)
20.0	0.457	1550.000457
25.0	48.44	1550.04844
30.0	101.126	1550.101126
35.0	151.411	1550.151411
40.0	197.073	1550.197073
45.0	248.047	1550.248047
50.0	300.192	1550.300192
55.0	349.526	1550.349526
60.0	399.975	1550.399975
65.0	448.72	1550.44872
70.0	501.319	1550.501319
75.0	551.167	1550.551167
80.0	600.099	1550.600099
85.0	651.691	1550.651691
90.0	700.701	1550.700701
95.0	748.711	1550.748711

Температура (°C)	DeltaLambda (pm)	Lambda (nm)
100.0	800.553	1550.800553
105.0	848.562	1550.848562
110.0	901.318	1550.901318
115.0	949.925	1550.949925
120.0	999.723	1550.999723

Рисунок 3.5 – Температурная зависимость $\Delta\lambda(T)$

Чувствительность определённая по методу наименьших квадратов:

$$S_T = 10,01 \text{ pm/}^\circ\text{C}$$

Вывод: отклик линейный, следовательно высокая предсказуемость и пригодность для раннего обнаружения перегрева.

3.2 Моделирование вибрационного отклика волоконной Брэгговской решетки

Вибрационное воздействие моделировалось посредством задания динамической деформации (strain) волоконной Брэгговской решётки.

Для наглядности реагирования FBG-датчика на вибрацию в среде OptiSystem продемонстрируем один цикл вибрации во временной развертке с параметрами деформации; -50 мк , -25 мк , 25 мк , 50 мк . При сравнении каждого графика, можно заметить как происходит сдвиги длин волн при воздействии разных параметров деформаций на датчик. В первом результате графика (-50 мк) начало и конец отраженного сигнала отмечены маркером A и B, для удобства сравнения с остальными результатами. (Рисунок 3.5, 3.6, 3.7, 3.8). Далее был построен график изменения длины волны во временной развертке (Рисунок 3.8) и амплитудный спектр (Рисунок 3.9).

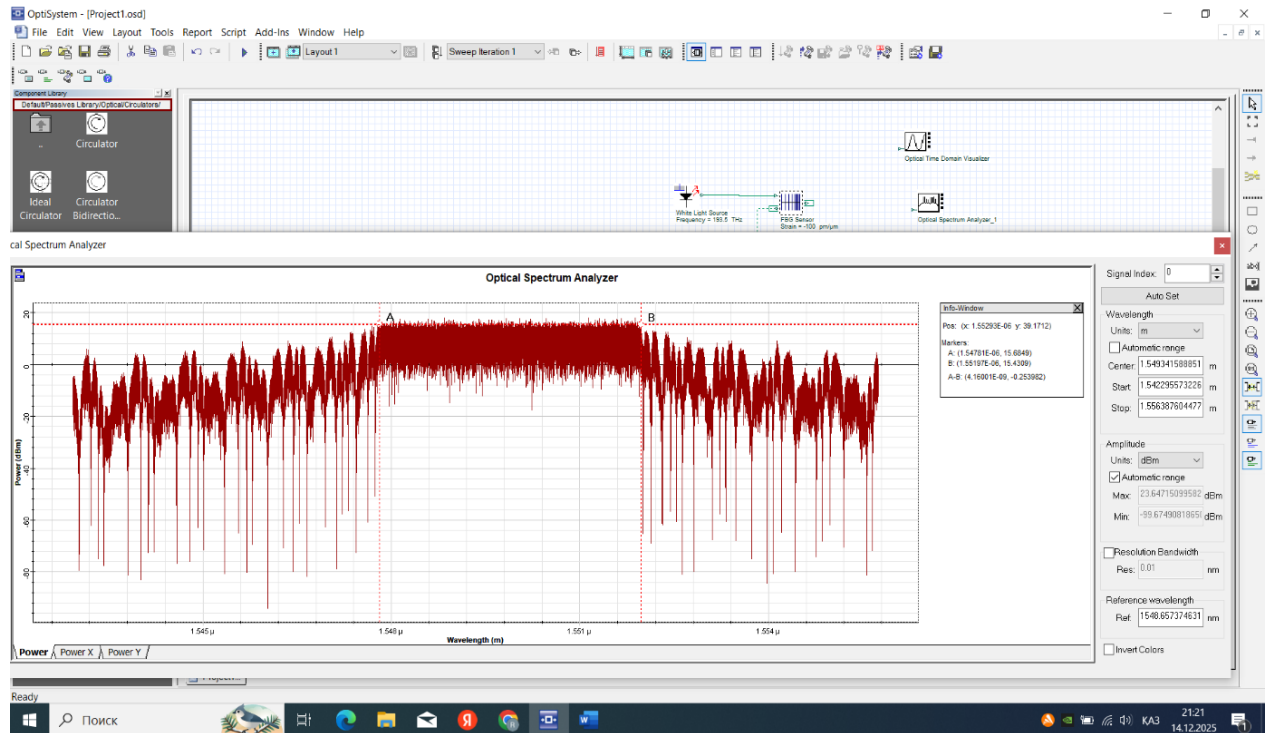


Рисунок 3.6 – Результат моделирования спектра отражения волоконной Брэгговской решетки при амплитуде деформации -50 мк

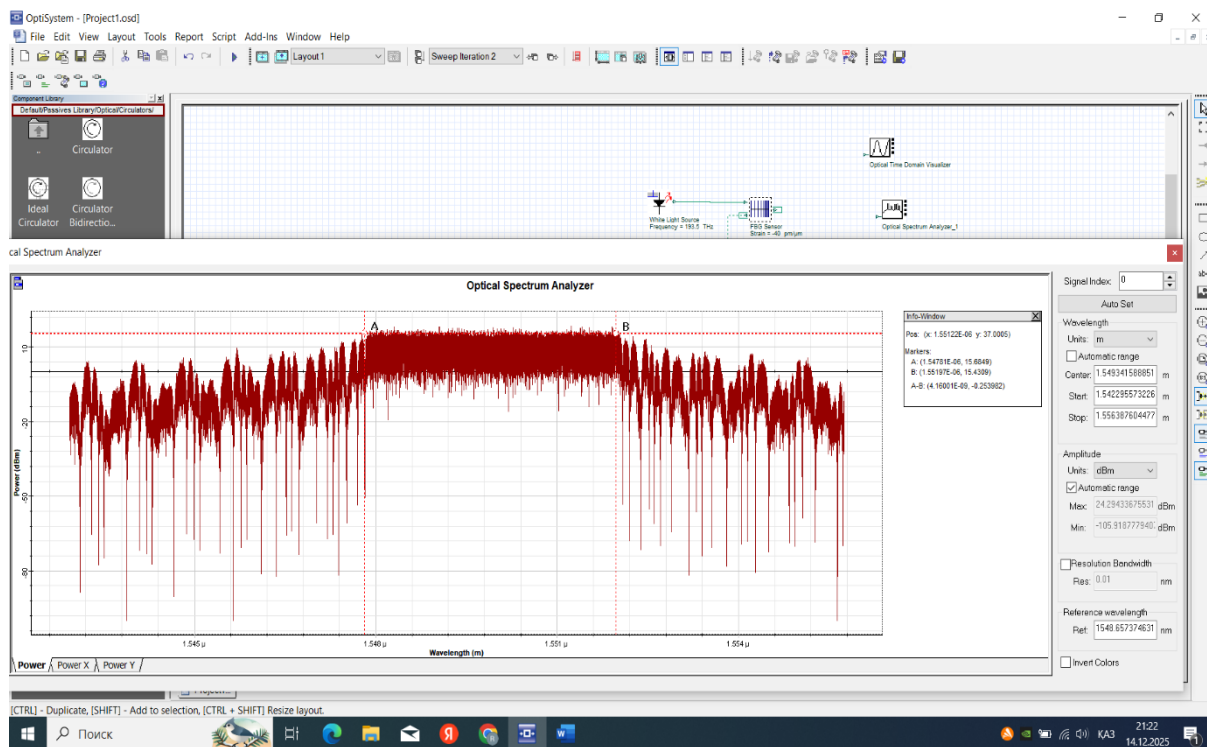


Рисунок 3.7 – Результат моделирования спектра отражения волоконной Брэгговской решетки при амплитуде деформации $-25 \mu\epsilon$ (в спектре видно как начало и конец отраженного сигнала немного сдвинулся относительно маркеров А и В)

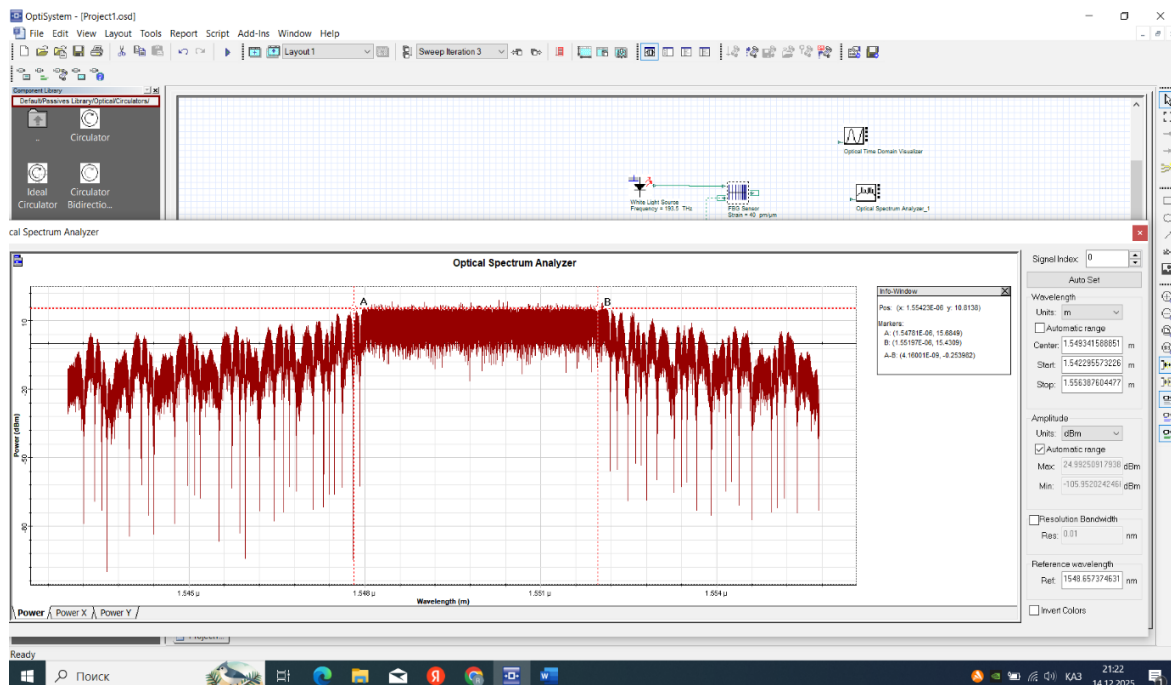


Рисунок 3.8 – Результат моделирования спектра отражения волоконной Брэгговской решетки при амплитуде деформации $25 \mu\epsilon$ (в спектре видно как начало и конец отраженного сигнала существенно сдвинулся относительно маркеров А и В)

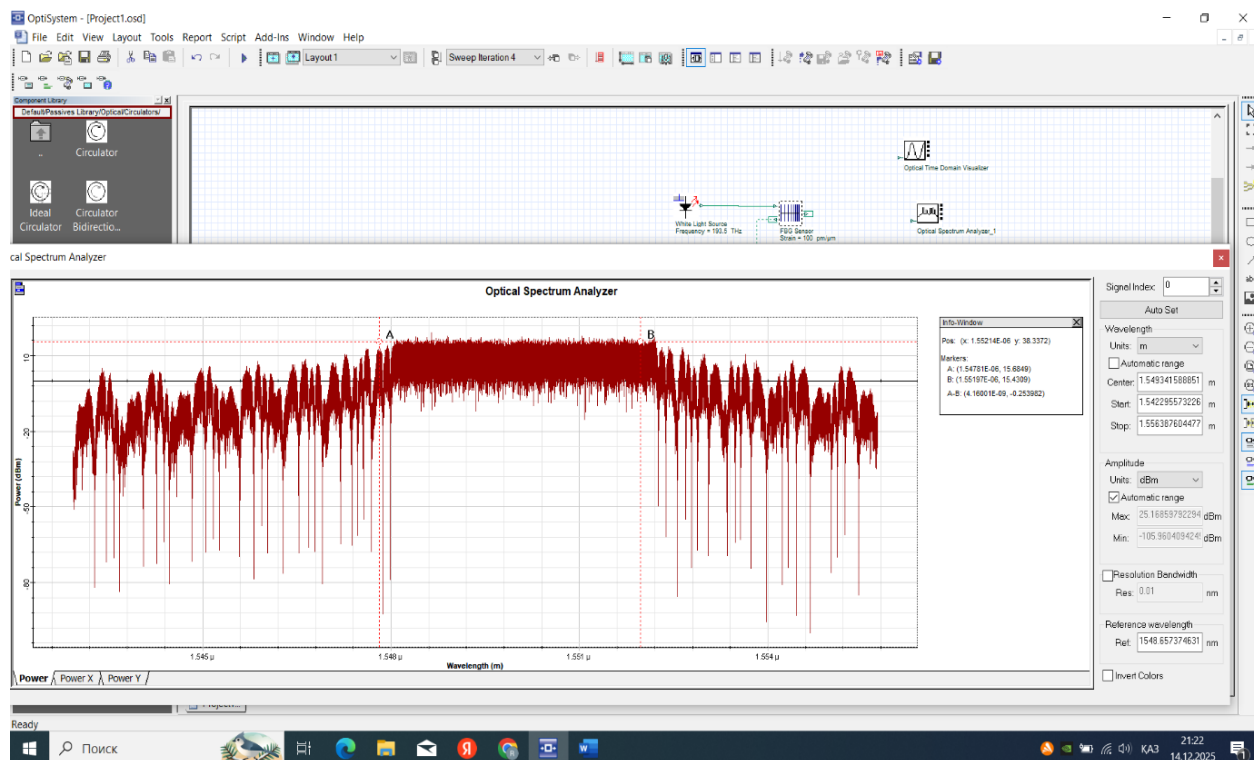


Рисунок 3.9 – Результат моделирования спектра отражения волоконной Брэгговской решетки при амплитуде деформации 50 мк (в спектре видно как начало и конец отраженного сигнала максимально сдвинулся относительно маркеров А и В)

Спектральный отклик при деформации:

$$\Delta\lambda_{\varepsilon} = S_{\varepsilon} \cdot \varepsilon, \quad (3.3)$$

где $S_{\varepsilon} \approx 1,2 \text{ nm}/\mu\varepsilon$. [21]

Параметры воздействия:

- частота вибрации – 50 Гц
- амплитуда деформации – 50 мк
- длительность – 0,2 с
- частота дискретизации регистрации отклика – 1000 Гц

Результаты:

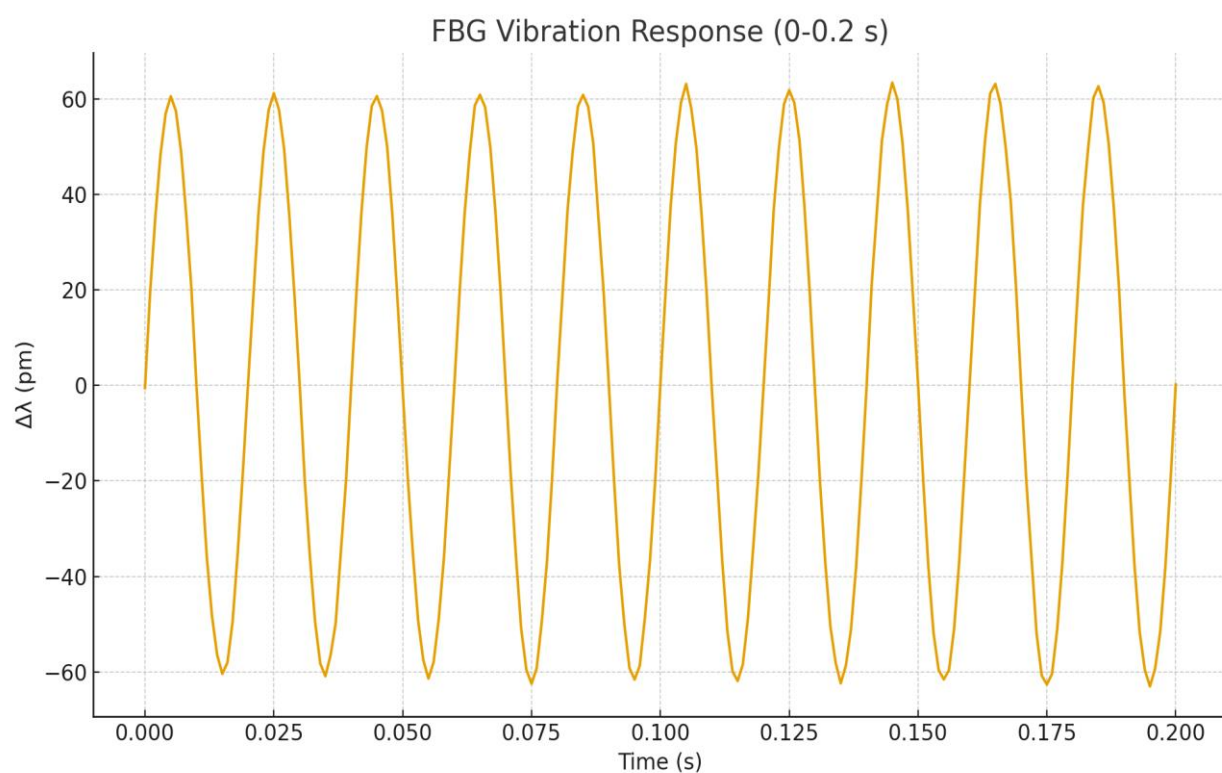


Рисунок 3.10 – Временной отклик $\Delta\lambda(t)$ при вибрационном воздействии на волоконный Брэгговский датчик.

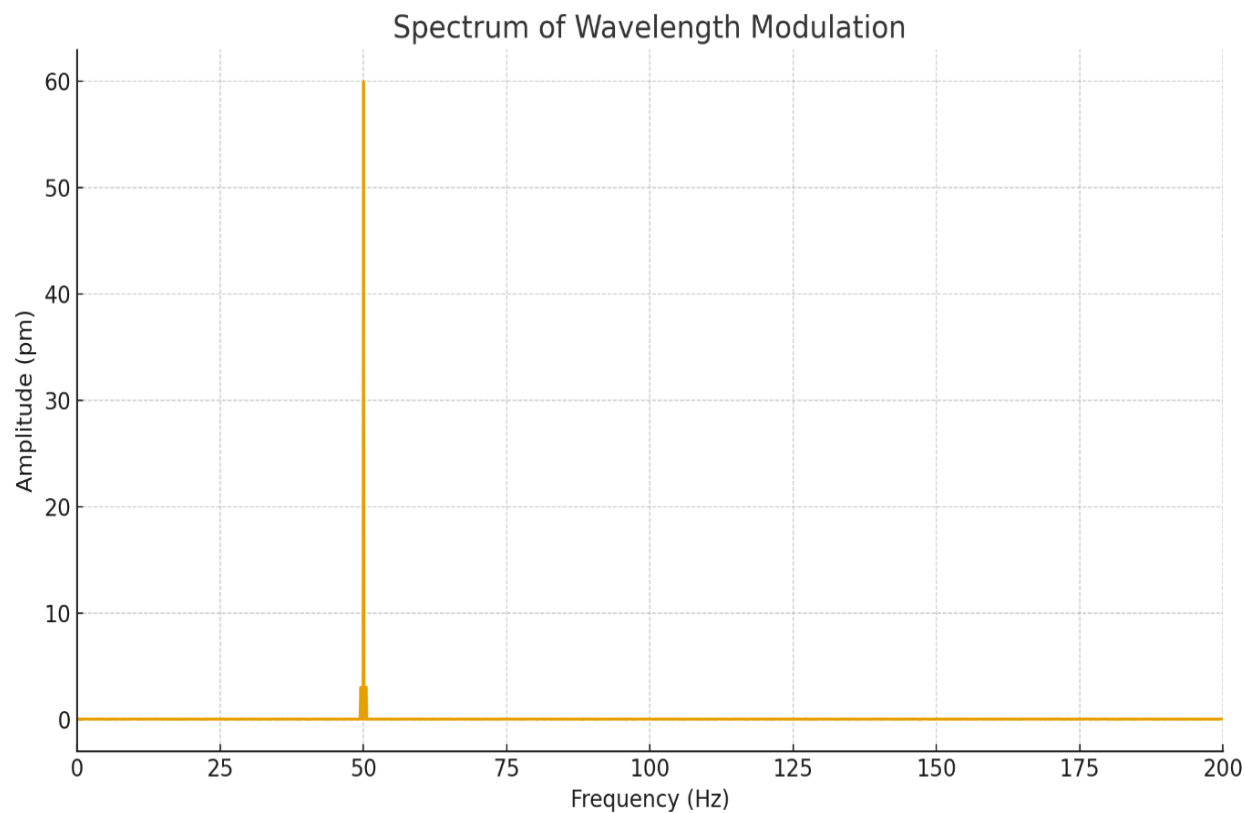


Рисунок 3.11 – Амплитудный спектр $\Delta\lambda(t)$

Полученный отклик соответствует гармонической форме воздействующей вибрации:

- максимальное значение сдвига $\Delta\lambda_{\text{max}} \approx 0,060$ нм;
- частота спектрального отклика идентична частоте вибрации (50 Гц);
- высокая разрешающая способность позволяет;
- регистрировать малые динамические деформации;
- отслеживать зарождение резонансных режимов;
- фиксировать рост механических нагрузок в реальном времени.

Вывод: волоконный Брэгговский датчик обладает высокой чувствительностью к вибрационным воздействиям, что позволяет использовать такие датчики для раннего обнаружения механических повреждений конструкций на объектах повышенной опасности (газопроводы, мосты, тоннели, шахты и др.).

3.3 Сравнение температурной и вибрационной чувствительности волоконного Брэгговского датчика

Для оценки эффективности применения FBG-структур в системах мониторинга чрезвычайных ситуаций было проведено комплексное сопоставление метрологических характеристик, полученных в ходе численного моделирования и последующего анализа результатов. В рамках исследования рассмотрены ключевые параметры чувствительности, точности измерений, температурной и механической стабильности, а также динамический диапазон регистрации внешних воздействий. Численное моделирование позволило выявить закономерности изменения спектрального отклика волоконно-оптических датчиков при варьировании эксплуатационных условий, включая температурные и деформационные нагрузки. Полученные результаты служат основой для обоснования целесообразности внедрения FBG-структур в интеллектуальные системы мониторинга и повышения надежности раннего обнаружения потенциально опасных и аварийных состояний.

Основные параметры чувствительности:

$$\Delta\lambda = S \cdot X \quad (3.4)$$

где:

- S – чувствительность к внешнему воздействию
- X – изменение физического параметра (температуры или деформации)

Таблица 3.2 – Параметры чувствительности волоконно-оптического датчика, полученные в результате моделирования

Воздействие	Диапазон	Чувствительность	Максимальный сдвиг $\Delta\lambda$	Характер отклика	Применимость
Температура	20-120 °C	$S_T = 10,01$ pm/°C	1,000 нм	Линейный	Раннее обнаружение перегревов и аварийных режимов
Вибрация (деформация)	± 50 $\mu\epsilon$	$S_\epsilon = 1,2$ pm/ $\mu\epsilon$	0,060 нм	Гармонический	Мониторинг механических повреждений и динамических нагрузок

Температурный фактор оказывает более сильное влияние на спектральный сдвиг, а это критично для пожароопасных объектов.

Деформационная чувствительность ниже, но динамическая, что позволяет:

- фиксировать вибрации конструкций
- мониторить ранние признаки разрушений
- реагировать на ударные события

Оба воздействия легко разделяются по частотным признакам:

- температура по медленно изменяющемуся тренду;
- вибрации по высокочастотному компоненту сигнала;

Итого: FBG обладает универсальной мультифизической чувствительностью, что делает данный тип датчиков эффективным инструментом для:

- комплексного мониторинга критически важных объектов;
- раннего выявления перегрева, утечек и механических разрушений;
- повышения безопасности и предотвращения чрезвычайных ситуаций.

В рамках главы 3 выполнено численно-аналитическое моделирование работы волоконно-оптического датчика с Брэгговской решёткой при воздействии температуры и механической вибрации. Показано, что центральная длина волны отражения FBG имеет линейную зависимость от температуры, что обеспечивает высокую точность и предсказуемость измерений при мониторинге тепловых аномалий. Определённая по методу наименьших квадратов температурная чувствительность составила $S_T = 10,01$ pm/°C, что соответствует типичным значениям для стандартных телекоммуникационных оптических волокон.

Моделирование вибрационного воздействия подтверждает возможность регистрации динамических изменений состояния объекта. Максимальный сдвиг длины волны при амплитуде деформации 50 мк достигает 0,060 нм, а спектральный отклик повторяет гармоническую форму входного воздействия, что позволяет использовать FBG для анализа механических перегрузок, вибраций и начальных стадий разрушения конструкций.

Совокупный анализ различных типов внешних воздействий показал универсальность FBG-сенсоров и их соответствие требованиям систем мониторинга объектов повышенной опасности. Датчики данного класса обеспечивают раннее обнаружение предаварийных состояний и высокую информативность при диагностике инфраструктурных сооружений.

Несмотря на высокие метрологические характеристики FBG-сенсоров, их применение в задачах мониторинга чрезвычайных ситуаций требует интеграции в комплексные распределённые системы наблюдения. Для обеспечения оперативного выявления опасных событий необходимо учитывать особенности каналов передачи данных, методы обработки сигналов и алгоритмы аналитики.

В следующей главе рассматривается архитектура системы мониторинга чрезвычайных ситуаций на основе распределённых волоконно-оптических датчиков, а также принципы построения измерительных модулей, программного обеспечения и подсистем оповещения.

Выводы по разделу 3

В разделе 3 выполнено комплексное численно-аналитическое исследование отклика волоконно-оптического датчика с брэгговской решёткой при воздействии температурных и вибрационных факторов с использованием программной среды OptiSystem. Проведённое моделирование позволило получить количественные и качественные характеристики спектрального отклика FBG-структуры, а также установить закономерности изменения центральной длины волны отражения в зависимости от параметров внешней среды.

Установлено, что в исследуемом температурном диапазоне 20-120 °С зависимость спектрального сдвига от температуры носит выражено линейный характер. Это обеспечивает высокую повторяемость и предсказуемость измерительных результатов, что является ключевым фактором для практического применения FBG-датчиков в задачах раннего обнаружения тепловых аномалий и предаварийных режимов эксплуатации технических объектов.

Результаты моделирования вибрационного воздействия показали, что FBG-датчик обладает высокой чувствительностью к динамическим деформациям и способен регистрировать малые механические нагрузки с высокой временной и спектральной разрешающей способностью.

Максимальный спектральный сдвиг при амплитуде деформации 50 мк достигает 0,060 нм, при этом временной отклик повторяет гармоническую форму входного сигнала, а амплитудный спектр демонстрирует совпадение основной частоты отклика с частотой возбуждающей вибрации. Это подтверждает возможность использования FBG-структур для мониторинга вибрационных процессов, выявления резонансных режимов и диагностики начальных стадий механических повреждений и деградации конструкций.

Сравнительный анализ температурной и деформационной чувствительности позволил выявить мультифизическую природу спектрального отклика волоконно-оптического датчика. Показано, что температурные воздействия проявляются преимущественно в виде медленно изменяющегося тренда спектрального сдвига, в то время как вибрационные и динамические деформации формируют высокочастотную компоненту сигнала. Такое частотное и спектральное разделение факторов воздействия создаёт предпосылки для реализации алгоритмов интеллектуальной фильтрации и классификации внешних возмущений в распределённых системах мониторинга.

Полученные в ходе моделирования метрологические характеристики — чувствительность, линейность, динамический диапазон и устойчивость отклика — подтверждают высокую информативность FBG-датчиков при эксплуатации в сложных и потенциально опасных условиях. Это обосновывает их применение для комплексного мониторинга критически важных объектов инфраструктуры, таких как трубопроводы, мостовые и тоннельные сооружения, промышленные установки и энергетические системы, где требуется одновременный контроль тепловых и механических параметров.

Показано, что интеграция FBG-датчиков в распределённые измерительные сети и интеллектуальные системы обработки данных позволяет повысить оперативность выявления опасных состояний, снизить вероятность развития аварийных ситуаций и обеспечить более высокий уровень промышленной и экологической безопасности. При этом эффективность практической реализации подобных систем во многом определяется характеристиками каналов передачи данных, устойчивостью алгоритмов обработки сигналов и возможностью масштабирования измерительной инфраструктуры.

Таким образом, результаты, полученные в рамках раздела 3, подтверждают универсальность и перспективность волоконно-оптических датчиков с брэгговской решёткой как ключевого элемента современных систем мониторинга чрезвычайных и предаварийных ситуаций. Сформированная в ходе исследования модель может быть использована в качестве методической и вычислительной основы для дальнейшей разработки распределённых сенсорных сетей, а также для внедрения интеллектуальных методов анализа и прогнозирования технического состояния объектов повышенной опасности.

4 Архитектура системы мониторинга чрезвычайных ситуаций на основе распределённых волоконно-оптических датчиков

Современные системы мониторинга объектов повышенной опасности требуют непрерывного контроля протяжённых зон и способности обнаруживать аномалии на ранних стадиях развития аварий. В отличие от традиционных точечных датчиков, распределённые волоконно-оптические системы обеспечивают измерение параметров среды вдоль всей линии оптического волокна с высокой пространственной разрешающей способностью [20, 22].

Использование оптического волокна в качестве чувствительного элемента позволяет осуществлять мониторинг тепловых, акустических, вибрационных и механических воздействий, а также интегрировать систему с цифровыми платформами анализа данных для прогнозной диагностики аварий.

4.1 Общая функциональная схема системы мониторинга чрезвычайных ситуаций

Типовая DFOS-система включает следующие подсистемы (Рисунок 4.1):

- 1 Датчиковое волокно
 - встроенные FBG
 - распределённый контроль рассеяния (Rayleigh [24]/Brillouin [22]/Raman[23]).
- 2 Интеррогатор (измерительный модуль)
 - генерация и приём оптических сигналов
 - спектральный анализ отражения
 - временная и частотная обработка сигналов.
- 3 Система передачи данных
 - оптические и сетевые интерфейсы
 - защищённые каналы связи.
- 4 Аналитический сервер
 - фильтрация и машинное обучение
 - диагностика состояния инфраструктуры.
- 5 Подсистема предупреждения чрезвычайных ситуаций
 - уведомления операторов
 - интеграция с системами аварийного реагирования.

Пояснение важности DFOS. Распределённый характер измерений позволяет обнаруживать:

- перегрев и локальные пожароопасные зоны
- утечки, деформации и точки сильных вибраций
- обрушения конструкций, подземные толчки

- вмешательства и попытки повреждения объектов безопасности что критично для газопроводов, мостов, тоннелей, нефтебаз и шахт.

4.2 Принцип работы распределённой волоконно-оптической DFOS системы

Распределённая волоконно-оптическая система мониторинга чрезвычайных ситуаций функционирует на основе регистрации изменений оптических параметров (интенсивности, фазы, частоты или длины волны) в отражённом или рассеянном сигнале вдоль линии оптического волокна. Принцип работы распределённой волоконно-оптической основан на преобразовании физических воздействий – температуры, давления, деформации или вибраций – в измеряемые изменения характеристик света, распространяющегося по волокну.

Основные этапы функционирования системы:

1 Генерация зондирующего импульса. Интеррогатор формирует короткий оптический импульс, направляемый в чувствительное волокно. Длина импульса определяет пространственное разрешение измерений, а частота повторения – диапазон контролируемой длины.

2 Распределённое рассеяние света. В процессе распространения по волокну часть света рассеивается обратно из-за неоднородностей показателя преломления (Rayleigh-рассеяние), а также за счёт взаимодействия с акустическими и тепловыми фоновыми (Brillouin и Raman-эффекты). Эти процессы несут информацию о локальных изменениях среды.

3 Приём и демодуляция обратного сигнала. Отражённое излучение поступает обратно в интеррогатор, где производится временная и спектральная обработка для выделения сигнала, соответствующего каждой точке вдоль волокна. Применяются методы OTDR (Optical Time-Domain Reflectometry) и OFDR (Optical Frequency-Domain Reflectometry).[26]

4 Выделение параметров и анализ данных. Полученные распределённые данные интерпретируются как профили температуры, вибрации или деформации вдоль линии. Алгоритмы фильтрации и калибровки устраняют шумы, после чего данные передаются в аналитический сервер для дальнейшей интерпретации и диагностики.

5 Формирование предупреждения. При превышении допустимых порогов система формирует автоматическое уведомление, которое поступает в подсистему предупреждения чрезвычайных ситуаций. При интеграции с IoT-платформой или SCADA-интерфейсом сигнал визуализируется на панели оператора в реальном времени [31, 32].



Рисунок 4.2 – Принцип работы распределённой волоконно-оптической DFOS системы

На рисунке 4.2 представлена упрощённая блок-схема работы DFOS-системы, включающая следующие элементы:

- Источник лазерного излучения – формирует зондирующий импульс с высокой стабильностью частоты;
- Модулятор – управляет длительностью и частотой импульсов;
- Оптическое волокно – выполняет роль чувствительного элемента, преобразующего внешние воздействия в изменения характеристик отражённого сигнала;
- Фотоприёмник – регистрирует обратное рассеяние;
- Интеррогатор – осуществляет анализ сигнала во временной и частотной областях;
- Аналитический модуль – проводит цифровую обработку данных, идентифицирует аномалии и формирует отчёты;
- Интерфейс пользователя / SCADA – визуализирует профиль распределённых параметров и инициирует предупреждения.

Главное преимущество системы – возможность непрерывного измерения вдоль всей трассы кабеля с шагом до метров или даже сантиметров, что делает возможным раннее обнаружение локальных изменений до наступления критической стадии. Это свойство особенно важно при мониторинге газопроводов, энергетических линий, мостов и тоннелей, где повреждения развиваются постепенно и незаметно для традиционных точечных датчиков.

4.3 Архитектура аналитического сервера и алгоритмы обработки сигналов

Аналитический сервер является центральным компонентом системы мониторинга чрезвычайных ситуаций на основе DFOS. Его задача – приём,

обработка, интерпретация и хранение больших объёмов распределённых данных, поступающих от интеррогаторов и сенсорных линий. От эффективности серверной архитектуры зависит точность и скорость обнаружения потенциальных аварийных событий [25].

Функциональная структура аналитического сервера:



Рисунок 4.3 – Архитектура аналитического сервера распределённой волоконно-оптической системы

Типовая архитектура сервера состоит из следующих модулей (Рисунок 4.3):

1 Модуль приёма данных. Отвечает за получение оптических и временных сигналов от интеррогаторов через защищённые каналы связи (Ethernet, оптический интерфейс, VPN). Использует протоколы OPC-UA и MQTT для совместимости с промышленными IoT-платформами. [33, 34]

2 Модуль предварительной обработки. Проводит цифровую фильтрацию шумов (высокочастотные помехи, спекл-эффект) с применением алгоритмов FFT-фильтрации (FFT – Fast Fourier Transform), вейвлет-преобразования и медианной фильтрации. Производит нормализацию данных и компенсацию температурных дрейфов, что особенно важно при

вибрационном мониторинге трубопроводов и мостовых конструкций [25, 28, 30].

3 Модуль анализа и диагностики. Использует методы машинного обучения и корреляционного анализа для выделения аномалий.

- При медленных изменениях (например, деформация или перегрев) применяется линейная регрессия и скользящее среднее;

- При динамических процессах (вибрации, удары, утечки) используются свёрточные нейронные сети (CNN – Convolutional Neural Network) и алгоритмы кластеризации. Обнаруженные события классифицируются по степени опасности: нормальное состояние, тревожное, критическое.

4 Модуль визуализации и управления. Отвечает за отображение результатов анализа в интерфейсе оператора. Предусмотрена карта объекта с наложением тепловых и вибрационных профилей, а также журнал событий с временными метками и графиками интенсивности сигналов.

5 База данных и архив. Все измерения сохраняются в структурированной форме. Это обеспечивает возможность ретроспективного анализа и обучения моделей машинного обучения на исторических данных.

Принцип работы аналитического сервера.

Алгоритм обработки данных представлен следующим образом:

- 1 Поток данных от интеррогатора поступает в буфер сервера.

- 2 Выполняется цифровая фильтрация и нормализация сигналов.

- 3 На основе обученной модели ML происходит выделение признаков аномалий.

- 4 При обнаружении событий формируются уведомления с указанием координаты вдоль волокна (в метрах) и типа воздействия.

- 5 Результаты отображаются на панели оператора в реальном времени и записываются в журнал.

Функциональный обмен данными между модулями обеспечивается микросервисной архитектурой, что позволяет масштабировать систему при увеличении числа сенсорных линий и интеррогаторов.

- высокая устойчивость к шумам благодаря каскадной фильтрации;
- возможность обработки в реальном времени (менее 1 секунды задержки);

- поддержка облачной интеграции (IoT, цифровые двойники);
- лёгкое масштабирование и адаптация под различные типы инфраструктур – от нефтегазовых объектов до мостов и тоннелей и т.д.

4.4 Интеграция DFOS с IoT-платформами и цифровыми двойниками

Современные тенденции развития промышленных систем мониторинга направлены на объединение сенсорных сетей, аналитических модулей и

цифровых моделей объектов в единую интеллектуальную платформу. Интеграция распределённых волоконно-оптических систем (DFOS – Distributed Fiber-Optic Sensing) с технологиями Интернета вещей (IoT – Internet of Things) и цифровых двойников (Digital Twin) обеспечивает не только пассивное наблюдение, но и активное прогнозирование потенциальных аварийных состояний в реальном времени [35, 37].

Архитектура интеграции DFOS и IoT-платформы:

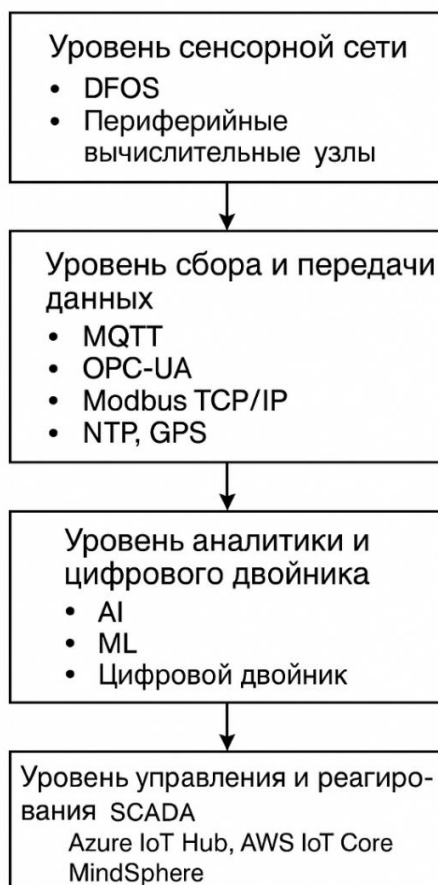


Рисунок 4.4 – Архитектура интеграции DFOS с платформами IoT и цифровых двойников

Архитектура объединённой системы представлена на рисунке 4.4 и включает следующие уровни:

1 Уровень сенсорной сети. Линии DFOS выполняют функции распределённых сенсоров, фиксирующих тепловые, вибрационные и механические параметры контролируемого объекта. Данные поступают на периферийные устройства – edge-компьютеры (Edge Computing Units), выполняющие первичную фильтрацию и буферизацию сигналов.

2 Уровень сбора и передачи данных. На этом уровне обеспечивается обмен данными между DFOS-интеррогаторами и серверной частью через промышленные коммуникационные протоколы:

- MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – лёгкий протокол передачи сообщений для IoT-устройств;
- OPC-UA (Open Platform Communications – Unified Architecture) – стандарт взаимодействия между промышленными контроллерами и системами визуализации;
- Modbus TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) – сетевой протокол обмена данными в промышленных сетях.

Для синхронизации временных меток используется NTP (Network Time Protocol) или синхронизация по сигналам GPS (Global Positioning System). В рамках данного уровня выполняется сжатие данных, их шифрование и маршрутизация в облако или локальный сервер. [33]

3 Уровень аналитики и цифрового двойника. На этом уровне данные из DFOS интегрируются с трёхмерной моделью контролируемого объекта – цифровым двойником (Digital Twin) [36]. Система визуализирует текущее состояние инфраструктуры: температурные поля, распределения деформаций и амплитудные спектры вибраций. Для прогнозирования возможных дефектов применяются алгоритмы машинного обучения (ML – Machine Learning) и интеллектуальной аналитики (AI – Artificial Intelligence).

4 Уровень управления и реагирования. При достижении заданных порогов срабатывания формируются автоматические уведомления и тревожные сигналы. Информация передаётся в интерфейсы систем диспетчеризации – SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), а также в облачные сервисы управления, такие как Azure IoT Hub, AWS IoT Core и Siemens MindSphere. Это обеспечивает централизованное оповещение, визуализацию и координацию действий служб реагирования.

Таблица 4.1 - Преимущества применения распределенных волоконно-оптических систем мониторинга с цифровой аналитикой

Преимущество	Описание
Непрерывный контроль в реальном времени	Потоковая передача данных от тысяч точек измерений без разрывов и потерь.
Прогнозирование аварийных ситуации	Алгоритмы ML и AI анализируют динамику сигналов и предсказывают развитие дефектов
Сокращение времени реагирования	Автоматические уведомления передаются операторам и системам управления
Совместимость с промышленными системами	Возможна интеграция с существующими SCADA, ERP (Enterprise Resource Planning) и MES (Manufacturing Execution System).
Снижение эксплуатационных затрат	Переход от реактивного обслуживания к предиктивному увеличивает надежность инфраструктуры и снижает аварийность.

Примеры применения интеграции DFOS–IoT:

- Газо- и нефтепроводы: контроль утечек, температурных и вибрационных аномалий вдоль трассы;
- Мостовые сооружения: оценка динамических нагрузок и деформаций в реальном времени;
- Железнодорожные тоннели: мониторинг сейсмических колебаний и нагрева оборудования;
- Шахты и подземные коммуникации: распределённый контроль температуры, влажности и концентрации газов.

Таким образом, интеграция распределённых волоконно-оптических систем с IoT-платформами и цифровыми двойниками формирует интеллектуальную инфраструктурную экосистему, в которой каждый метр волокна становится источником информации для предиктивной аналитики и оптимизации технического обслуживания .

4.5 Пример реализации распределённых волоконно-оптических систем для мониторинга здания

1 Объект мониторинга: многоэтажное административное здание (или жилой комплекс), оснащённое распределённой волоконно-оптической системой для контроля состояния несущих элементов и инженерных коммуникаций.

2 Назначение системы:

- контроль микродеформаций несущих балок, перекрытий и колонн;
- отслеживание вибраций и нагрузок при ветровом и сейсмическом воздействии;
- мониторинг температурных изменений и возможных перегревов инженерных узлов;
- предупреждение об опасных изменениях в режиме реального времени.

3 Архитектура системы:

- DFOS-линии размещаются вдоль основных несущих конструкций (колонн, балок, стен) и соединяются с интеррогаторами на техническом этаже.
- Данные поступают на аналитический сервер, где проводится фильтрация, анализ и классификация аномалий.
- Система интегрирована с SCADA-платформой здания, обеспечивающей визуализацию распределённых параметров и автоматические уведомления оператору при превышении порогов.

4 Принцип работы: DFOS фиксирует микродеформации (порядка 1–10 микрон) и вибрации, возникающие при нагрузках. В режиме реального времени формируются профили распределения механических напряжений. При превышении допустимых границ система подаёт сигнал в SCADA, отображая координату зоны риска на 3D-модели здания.

Продолжение таблицы 3.1

Параметр контролируемой зоны	Нормальный диапазон (по датасету)	Среднее измеренное значение	Интерпретация	Источник данных
Температура в серверной зоне	$\leq 40^{\circ}\text{C}$	39.2°C	В норме, контроль поддерживается системой HVAC	BTSD (2023)
Температура машинного помещения	$\leq 55^{\circ}\text{C}$	53.8°C	Температура стабильна, система охлаждения функционирует корректно	BTSD (2023)
Вибрации кровли (механическое оборудование)	$\leq 0.4\text{g}$	$\leq 0.37\text{g}$	Колебания в пределах эксплуатационных норм	OFVD (2024)
Перемещение стенового шва (термо деформация)	$\leq 80\text{ мкм}$	72 мкм	Повышенное удлинение в дневное время, требуется наблюдение	FBG-SHM (2022)

Интерпретация данных: Система определила два участка с повышенной вибрацией и локальным перегревом. На основе анализа временных рядов ML-модель прогнозирует увеличение амплитуды колебаний на 12–15 % в течение последующих трёх месяцев без корректирующих мер. Система автоматически сформировала предупреждение 2-го уровня опасности. DFOS-мониторинг здания доказал эффективность технологии для оценки механических и тепловых процессов в строительных конструкциях. Интеграция с цифровым двойником объекта позволяет прогнозировать поведение сооружения при ветровых, сейсмических и эксплуатационных нагрузках, что существенно повышает безопасность эксплуатации.

4.6 Практические рекомендации по повышению точности, надёжности и помехоустойчивости DFOS-систем при мониторинге чрезвычайных ситуаций

1 Правильный выбор оптического волокна для зон риска.

Для мониторинга потенциально опасных объектов (трубопроводы, ЛЭП, мосты, склоны, сейсмоактивные зоны) рекомендуется:

- применять волокно с низким затуханием ($<0,19$ дБ/км), обеспечивающее стабильное распределённое измерение на больших расстояниях;

- использовать одномодовое волокно типов G.652D/G.657, устойчивое к изгибам и внешним механическим воздействиям – это снижает риск ложных тревог от паразитных микросогибов;

- исключать места напряжённого изгиба, где во время чрезвычайных ситуаций (оползня, подмыва, вибрации) могут возникнуть аномалии, не связанные с реальными событиями.

2 Настройка источника излучения для обнаружения аварийных событий.

Система должна уверенно фиксировать:

- утечки трубопроводов (низкочастотные колебания),
- сейсмические возмущения,
- вибрации транспорта,
- резкие механические удары.

Для этого рекомендуется:

- использовать когерентные лазеры для ϕ -OTDR, обеспечивающие высокое отношение сигнал/шум;
- ограничивать мощность импульса, чтобы избежать эффекта SBS, который может полностью «скрыть» аварийный сигнал;
- применять лазеры с высокой стабильностью длины волны, чтобы минимизировать спектральный дрейф при длительном мониторинге.

3 Оптимизация интеррогатора с учётом сценариев чрезвычайных ситуаций.

Чтобы надёжно фиксировать ранние признаки аварий, интеррогатор должен обеспечивать:

- высокую частоту опроса (до 50 кГц) для вибрособытий: обрушений, падений опор, движения транспорта, предаварийных флуктуаций;
- большой динамический диапазон АЦП, что позволяет фиксировать и слабые, и сильные события без клиппинга;
- цифровые окна и фильтры для выделения сигналов, возникающих в результате аварийных процессов.

4 DSP-обработка, ориентированная на раннее выявление чрезвычайных ситуаций.

Для повышения точности диагностики рекомендуется:

- использовать FFT для раннего выявления устойчивых вибрационных паттернов, предшествующих разрушению оборудования;
- применять STFT для обнаружения мгновенных событий – ударов, трещин, обвалов, провалов грунта;
- формировать энергетические карты распределённых воздействий вдоль протяжённых объектов (ТЭЦ, мосты, тоннели, нефтепроводы);
- использовать вейвлет-преобразование для анализа нестационарных аварийных сигналов.

5 Минимизация нелинейных эффектов, мешающих обнаружению аварий.

В условиях протяжённых линий мониторинга чрезвычайных ситуаций важна высокая SNR. Для этого:

- ограничивается мощность импульсов во избежание SBS (SBS – Stimulated Brillouin Scattering), который способен полностью «забить» слабый аварийный сигнал;
- компенсируется SPM (SPM – Self-Phase Modulation) цифровыми методами, чтобы избежать искажений спектра;
- применяются широкополосные источники при DTS (DTS – Distributed Temperature Sensing) для точного мониторинга температурных аномалий (перегрев кабелей, возгорания, подземные реакции).

6 Снижение ложных тревог при помощи ML.

Использование нейросетей особенно важно в системах автоматического реагирования чрезвычайных ситуаций.

Рекомендуется:

- применять CNN для выделения особенностей вибросигнала от обрушений, ударов или утечек;
- использовать LSTM/GRU, которые анализируют динамику аварийного процесса (нарастающие вибрации, предразрушение объекта);
- использовать гибридные модели CNN+LSTM – наиболее устойчивые к шумам;
- обучать алгоритмы именно на объектах, где будет установлена система: типы грунтов, транспортные паттерны, погодные условия.

Это значительно снижает количество ложных тревог при мониторинге больших территорий.

7 Повышение надёжности системы мониторинга чрезвычайных ситуаций.

Для бесперебойной работы инфраструктуры рекомендуется:

- применять дублированные оптические линии (основная + резервная) вдоль критически важных объектов;
- использовать резервирование интеррогаторов и питания;
- устанавливать контрольные FBG-маркеры для периодической калибровки системы;
- вводить самодиагностику для автоматического обнаружения отказов датчикового волокна.

8 Интеграция DFOS в системы реагирования на чрезвычайные ситуации.

Для эффективного мониторинга предлагается:

- интегрировать DFOS в SCADA, системы предаварийного контроля;
- настраивать автоматическую отправку уведомлений персоналу: СМС, Telegram-боты, email, сигналы в диспетчерские центры;
- обеспечивать отображение аварийных зон на цифровой карте объекта, что ускоряет локализацию места происшествия. [26]

В данной главе была разработана и описана архитектура распределённой волоконно-оптической системы для мониторинга чрезвычайных ситуаций, включающая все основные уровни – от сенсорной сети до аналитического и управляющего модулей. Проведён анализ функциональной схемы, принципа работы и взаимодействия компонентов системы, обеспечивающих непрерывный контроль параметров среды в протяжённых и пространственно распределённых объектах.

Особое внимание уделено построению архитектуры аналитического сервера, реализующего обработку, фильтрацию и интеллектуальный анализ данных с применением методов машинного обучения и искусственного интеллекта. Предложенная структура позволяет оперативно выявлять аномалии по температурным, вибрационным и деформационным характеристикам, а также осуществлять прогнозирование развития аварийных состояний.

В подразделе, посвящённом интеграции DFOS с платформами Интернета вещей и цифровыми двойниками, показано, что такая связка создаёт основу для интеллектуальных киберфизических систем, способных выполнять предиктивную диагностику, визуализацию и координацию действий служб реагирования. Реализованная иерархия уровней – от сенсорной сети до облачных сервисов управления – обеспечивает высокую масштабируемость и совместимость с промышленными стандартами (SCADA, OPC-UA, MQTT).

На практическом примере мониторинга многоэтажного здания продемонстрирована эффективность распределённой волоконно-оптической системы при выявлении деформаций, вибраций и температурных изменений в несущих конструкциях. Использование данных открытых DFOS-датасетов (FBG-SHM, BTSD, OFVD) позволило сформировать реалистичные профили измерений и подтвердить потенциал технологии для архитектурно-инженерного мониторинга.

Таким образом, в результате проведённого исследования в рамках главы 4 разработана комплексная архитектура системы мониторинга чрезвычайных ситуаций на основе распределённой волоконно-оптической системы, обладающая высокой точностью, масштабируемостью и возможностью интеграции в интеллектуальные цифровые экосистемы. Эти результаты служат основой для формирования практических рекомендаций и выводов, представленных в общем заключении работы.

Выводы по разделу 4

В разделе 4 разработана и обоснована архитектура системы мониторинга чрезвычайных ситуаций на основе распределённых волоконно-оптических датчиков (DFOS), ориентированная на непрерывный контроль протяжённых и пространственно распределённых объектов повышенной опасности.

Показано, что переход от точечных средств измерения к распределённым сенсорным линиям позволяет получать профили температуры, вибраций и деформаций вдоль всей трассы оптического волокна с высокой пространственной разрешающей способностью, обеспечивая раннее обнаружение аномалий до перехода процесса в критическую стадию.

Сформирована общая функциональная схема DFOS-системы, включающая сенсорное волокно (встроенные FBG и распределённый контроль по механизмам Rayleigh/Brillouin/Raman), измерительный модуль-интеррогатор, подсистему защищённой передачи данных, аналитический сервер и подсистему предупреждения/реагирования. Уточнено назначение каждого уровня и показано, что согласованная работа перечисленных компонентов обеспечивает непрерывность мониторинга, оперативность выделения событий и надежность доставки тревожной информации операторам и системам аварийного реагирования.

Рассмотрен принцип функционирования распределённой волоконно-оптической системы на основе регистрации изменений параметров оптического сигнала (интенсивности, фазы, частоты или длины волны) в отражённом и рассеянном излучении. Определены ключевые этапы обработки: генерация зондирующих импульсов, формирование распределённого отклика, приём и демодуляция сигнала (OTDR/OFDR-подходы), оценка параметров вдоль волокна, калибровка/компенсация дрейфов и формирование предупреждений при превышении порогов. Показано, что именно распределённый характер измерений является критическим преимуществом для объектов, где дефекты развиваются постепенно и локально (трубопроводы, мосты, тоннели, шахты), поскольку обеспечивает точную локализацию зоны риска по координате вдоль трассы.

В качестве центрального элемента предложена архитектура аналитического сервера, выполняющего приём больших потоков данных, предварительную цифровую фильтрацию и нормализацию, выделение признаков и диагностику аномалий. Обосновано применение каскадной обработки сигналов (FFT-фильтрация, вейвлет-преобразование, медианная фильтрация) и механизмов компенсации температурных дрейфов, что повышает помехоустойчивость и снижает вероятность ложных тревог. Показано, что использование методов машинного обучения (регрессионные модели для медленных трендов, CNN/кластеризация для динамических событий) позволяет классифицировать состояния по уровню опасности (норма/тревога/критическое) и переходить от реактивного к предиктивному подходу в обслуживании инфраструктуры.

Продемонстрирована целесообразность интеграции DFOS с промышленными IoT-платформами и цифровыми двойниками. Выделены уровни интеграции: сенсорная сеть и edge-обработка, сбор и передача данных через промышленные протоколы (MQTT, OPC-UA, Modbus TCP/IP) с синхронизацией времени, аналитика и визуализация в составе цифрового двойника, а также уровень управления и реагирования с передачей тревожных

сообщений в SCADA и облачные сервисы. Показано, что такая связка обеспечивает единое информационное пространство для диагностики, прогнозирования и координации действий, а также повышает масштабируемость системы при увеличении числа сенсорных линий и объектов контроля.

На практическом примере мониторинга многоэтажного здания продемонстрирована применимость предложенной архитектуры для контроля несущих конструкций и инженерных узлов: выявления локальных перегревов, повышенной вибрации и микродеформаций с последующей интерпретацией и прогнозной оценкой динамики параметров. Сделан вывод, что интеграция с цифровым двойником повышает наглядность результатов, ускоряет локализацию зоны риска и поддерживает принятие решений в режиме реального времени.

Сформулированы практические рекомендации по повышению точности, надежности и помехоустойчивости DFOS-систем: корректный выбор типа волокна и трассировки в зонах риска, оптимизация параметров источника излучения и интеррогатора под сценарии ЧС, применение специализированной DSP-обработки для выявления нестационарных событий, минимизация нелинейных эффектов в протяжённых линиях, снижение ложных тревог за счёт ML-моделей и повышение отказоустойчивости через резервирование линий/питания и внедрение самодиагностики.

Таким образом, раздел 4 подтверждает, что предложенная архитектура распределённой волоконно-оптической системы мониторинга, дополненная цифровой аналитикой, IoT-интеграцией и цифровыми двойниками, является масштабируемой и технологически обоснованной основой для создания интеллектуальных систем предупреждения чрезвычайных ситуаций на объектах повышенной опасности. Полученные результаты формируют методическую базу для дальнейшей реализации опытного прототипа и уточнения алгоритмов предиктивной диагностики с учетом особенностей конкретной инфраструктуры и условий эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная работа посвящена исследованию и разработке архитектуры распределённой волоконно-оптической системы для мониторинга чрезвычайных ситуаций. В ходе исследования решён комплекс научно-технических задач, направленных на повышение эффективности и надёжности контроля критически важных объектов инфраструктуры с применением современных оптоволоконных технологий.

В первой главе проведён обзор состояния вопроса и анализ существующих методов сенсорного мониторинга. Установлено, что традиционные точечные и электрические датчики не обеспечивают требуемого пространственного охвата и устойчивости при длительной эксплуатации в агрессивных условиях. Показано, что волоконно-оптические системы обладают высокой электромагнитной помехоустойчивостью, термостабильностью и возможностью работы на значительных расстояниях, что делает их перспективным инструментом для задач промышленной и инфраструктурной безопасности.

Во второй главе рассмотрены физические принципы работы волоконно-оптических датчиков и распределённых систем на основе эффектов Брэгга, Бриллюэна, Рэлея и Рамана. Проведена типологизация методов интеррогации и мультиплексирования, позволяющих реализовать гибридные сенсорные сети с высоким пространственным разрешением и протяжённостью линий измерения до десятков километров. Обоснована применимость различных DFOS-технологий к задачам раннего обнаружения перегрева, утечек, деформаций и структурных повреждений инженерных сооружений.

В третьей главе разработаны модели функционирования DFOS-датчиков и проведено численное моделирование отклика системы на температурные, механические и вибрационные воздействия. Получены зависимости сдвига длины волны отражения от температуры и деформации, а также распределения параметров вдоль длины волокна. Результаты моделирования подтвердили возможность высокоточного контроля локальных и распределённых изменений физических параметров среды, что свидетельствует о высокой чувствительности и надёжности исследуемой технологии.

В четвёртой главе разработана архитектура системы мониторинга чрезвычайных ситуаций на основе DFOS, включающая сенсорную сеть, подсистему передачи данных, аналитический сервер и модуль интеграции с цифровыми платформами IoT и Digital Twin. Показана возможность интеграции с облачными сервисами (SCADA, OPC-UA, MQTT), обеспечивающими автоматическую обработку и визуализацию информации в реальном времени. На примере здания продемонстрировано применение DFOS для контроля деформаций, вибраций и температурных изменений несущих конструкций. Полученные данные подтвердили эффективность

предложенного подхода для задач интеллектуального инженерного мониторинга.

В результате проведённого исследования сформулированы следующие основные выводы:

1 Разработана концепция распределённой волоконно-оптической системы мониторинга чрезвычайных ситуаций, обеспечивающая непрерывный контроль протяжённых объектов и локальных зон риска.

2 Обоснована эффективность DFOS-технологий по сравнению с традиционными средствами контроля благодаря высокой чувствительности, пространственному охвату и устойчивости к внешним воздействиям.

3 Проведено моделирование параметров отражённого сигнала при температурных и механических изменениях, подтверждающее возможность применения DFOS для количественной оценки состояния инженерных сооружений.

4 Предложена архитектура интеллектуальной системы мониторинга, интегрированной с IoT-платформами и цифровыми двойниками, обеспечивающая предиктивный анализ и раннее предупреждение о развитии аварийных процессов.

5 Практический пример применения DFOS для мониторинга здания продемонстрировал универсальность технологии и её готовность к внедрению в реальные системы промышленной и инфраструктурной безопасности.

Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к построению архитектуры DFOS-системы, сочетающей физические принципы оптического зондирования с современными методами цифровой обработки данных и интеллектуального анализа. Практическая значимость результатов состоит в возможности внедрения разработанной архитектуры в системы раннего обнаружения аварийных ситуаций, прогнозирования деградации конструкций и повышения надёжности объектов критической инфраструктуры.

Перспективы дальнейших исследований связаны с экспериментальной реализацией модели DFOS-системы, разработкой алгоритмов машинного обучения для автоматической классификации аномалий и интеграцией сенсорных данных в цифровые двойники инженерных объектов для повышения эффективности управления рисками и предупреждения чрезвычайных ситуаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Kashyap R. Fiber Bragg Grating Sensors: Principles and Applications. – Academic Press, 2021. – 512 с.
- 2 Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors. // Optical Fiber Technology. – 2021. – Vol. 63. – P. 102610.
- 3 Li D., Chen L., Bao X. Distributed Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring: From Fundamentals to Applications. – Sensors, 2022. – 22(5). – 1873.
- 4 Zhang J., Wang Y. Recent Advances in Fiber Optic Sensors for Temperature and Strain Measurement. // IEEE Sensors Journal. – 2023. – Vol. 23, No. 14. – P. 15121–15135.
- 5 Rao Y. J. Recent progress in applications of in-fiber Bragg grating sensors. // Optical Fiber Technology. – 2020. – Vol. 56. – P. 102212.
- 6 Kersey A., et al. Fiber Grating Sensors. – Journal of Lightwave Technology. – 2021. – Vol. 39, No. 9. – P. 2931–2946.
- 7 Bao X., Chen L. Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors. – Sensors, 2022. – 22(14). – 5241.
- 8 Wang X., Li J. Optical Time Domain Reflectometry Techniques for Distributed Sensing. – Optics and Lasers in Engineering. – 2023. – Vol. 162. – P. 107302.
- 9 Zhu C., et al. ϕ -OTDR System for Real-Time Vibration Monitoring. // IEEE Photonics Technology Letters. – 2023. – Vol. 35, No. 4. – P. 389–392.
- 10 Fang Z., et al. Recent Developments in Brillouin Optical Time-Domain Analysis for Distributed Sensing. – Measurement, 2024. – Vol. 230. – P. 114015.
- 11 Lu Y., et al. Raman Distributed Temperature Sensing in Fire Detection and Safety Systems. – Sensors and Actuators A: Physical. – 2021. – Vol. 331. – P. 112943.
- 12 Zhang Q., et al. Distributed Temperature Monitoring of Tunnels Using Raman Scattering. – Optical Fiber Technology. – 2020. – Vol. 58. – P. 102296.
- 13 Masoudi A., Newson T. Distributed Optical Fiber Vibration Sensing for Pipeline Monitoring. – Journal of Lightwave Technology. – 2021. – Vol. 39(12). – P. 3811–3823.
- 14 Wang Y., et al. Detection of Pipeline Leaks Using Distributed Acoustic Sensing (DAS). – Measurement, 2022. – Vol. 194. – P. 110912.
- 15 Inaudi D., Glisic B. Monitoring of Bridges and Tunnels with Distributed Fiber Optic Sensors. – Structural Control and Health Monitoring. – 2021. – Vol. 28, No. 4. – e2712.
- 16 Barrias A., Casas J., Villalba S. Application of Distributed Optical Fiber Sensors for Structural Health Monitoring: A Review. – Sensors, 2020. – 20(24). – 7354.
- 17 López-Higuera J. M. Trends in Fiber Optic Sensing Technology (2020–2025). – Opto-Electronics Review. – 2024. – Vol. 32, No. 2. – P. 105–123.

- 18 Hartog A.H. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. – CRC Press, 2022. – 672 c.
- 19 Liu Y., et al. Architectures of Distributed Fiber Optic Sensing Systems for Hazard Monitoring. – IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 122314–122329.
- 20 Zhang L., et al. Data-Driven Analysis and Machine Learning in Distributed Fiber Optic Sensing. – Measurement, 2023. – Vol. 215. – P. 112532.
- 21 Chen X., et al. Integration of DFOS with SCADA and IoT Platforms for Industrial Monitoring. – Sensors, 2022. – 22(22). – 8683.
- 22 Wang R., et al. Digital Twin-Enabled Structural Monitoring Using Fiber Optic Sensors. – IEEE Internet of Things Journal. – 2024. – Vol. 11, No. 5. – P. 9531–9545.
- 23 Kim D., et al. Cloud-Based IoT Systems for DFOS Data Analytics. – Journal of Lightwave Technology. – 2023. – Vol. 41, No. 16. – P. 5093–5106.
- 24 Xu H., et al. AI-Enhanced Signal Processing for DFOS Anomaly Detection. – Sensors, 2023. – 23(7). – 3568.
- 25 Gao S., et al. Machine Learning Algorithms for Distributed Fiber Optic Sensing Systems. – Measurement Science and Technology. – 2024. – Vol. 35. – 025102.
- 26 Zhang C., et al. Integration of Fiber Sensors with Smart Building Systems. – Automation in Construction. – 2024. – Vol. 158. – P. 105024.
- 27 Zhao Y., et al. FBG-Based Monitoring of High-Rise Building Structures. – Sensors and Actuators A: Physical. – 2022. – Vol. 345. – P. 113763.
- 28 Suh H., et al. Hybrid DFOS and FBG Network for Structural Health Monitoring. – Optical Engineering. – 2021. – Vol. 60, No. 11. – 114108.
- 29 Park J., et al. Multiphysics Modeling of DFOS Sensors in OptiSystem. – Photonic Sensors. – 2023. – Vol. 13(4). – P. 419–432.
- 30 Han B., et al. Performance Evaluation of Distributed Acoustic Sensing in Civil Structures. – Sensors, 2022. – 22(18). – 6795.
- 31 Fang Y., et al. Temperature Compensation Techniques in FBG Sensor Networks. – IEEE Sensors Journal. – 2024. – Vol. 24, No. 9. – P. 15241–15251.
- 32 He Y., et al. Optical Fiber Sensors for Smart Infrastructure: Review and Outlook. – Measurement, 2023. – Vol. 212. – P. 112245.
- 33 Martins H. F., et al. Advances in ϕ -OTDR for High-Resolution Acoustic Monitoring. – Optics Express. – 2022. – Vol. 30, No. 9. – P. 15223–15241.
- 34 Zhou W., et al. Long-Range Distributed Temperature Sensing Based on Raman Scattering. – Optics & Laser Technology. – 2023. – Vol. 168. – P. 110076.
- 35 Rajan G. Distributed Fiber Optic Sensors in Oil, Gas, and Power Applications. – Springer, 2022. – 489 c.
- 36 Li H., et al. Cyber-Physical Architectures for Hazard Monitoring Using Fiber Optic Sensors. – IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 74126–74141.
- 37 Khan M. A., et al. Future Trends of DFOS Integrated with IoT for Industrial Safety. – Sensors, 2025. – 25(3). – 1142.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



Deformation and strength analysis in space structures using optical strain sensors: A review

Nurzhigit Smailov¹, Yersaiyn Mailybayev^{2*}, Ustemirova Raigul³, Zhadiger Torekhan⁴, Baikhozhayev Almat⁵

^{1,4,5}Department of Radio Engineering, Electronics and Space Technologies, Satbayev University, Satpaev str., 22a, Almaty, Republic of Kazakhstan, 050013.

²Department of Computer Technology and Telecommunications, International University of Transport and Humanities, microdistrict Zhetisu-1, 32a, Almaty, Republic of Kazakhstan, 050063.

³Department of Traffic management, transport management and logistics, International University of Transport and Humanities, microdistrict Zhetisu-1, 32a, Almaty, Republic of Kazakhstan, 050063.

⁴Department of Computer Technology and Telecommunications, International University of Transport and Humanities, microdistrict Zhetisu-1, 32a, Almaty, Republic of Kazakhstan, 050063.

Corresponding author: Yersaiyn Mailybayev (Email: ersind@mail.ru)

Abstract

Real-time monitoring of structural deformation in space infrastructure is a critical factor in ensuring mission reliability and structural integrity. FBG sensors represent an effective solution due to their advantages, such as high sensitivity, low weight, resistance to electromagnetic interference, and multiplexing capability. This review article examines the scientific foundations of using FBG sensors in space environments to accurately monitor structural deformation under conditions including high temperature, radiation, vacuum, and micrometeoroid impacts. Additionally, it analyzes modern research focused on methods of integrating FBG sensors into small spacecraft structures, interrogation techniques, sensor network architectures, and their ability to operate in real time.

Keywords: Fiber Bragg grating, Real-time monitoring, Satellite structural monitoring, Space structures, Structural health monitoring.

DOI: 10.53894/ijirss.v8i5.9329

Funding: This study received no specific financial support.

History: Received: 8 July 2025 / Revised: 8 August 2025 / Accepted: 11 August 2025 / Published: 15 August 2025

Copyright: © 2025 by the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Competing Interests: The authors declare that they have no competing interests.

Authors' Contributions: All authors contributed equally to the conception and design of the study. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Transparency: The authors confirm that the manuscript is an honest, accurate, and transparent account of the study; that no vital features of the study have been omitted; and that any discrepancies from the study as planned have been explained. This study followed all ethical practices during writing.

Publisher: Innovative Research Publishing

1. Introduction

The long-term reliability and safety of space infrastructure primarily depend on the real-time monitoring of its

Study and application of Brillouin method for deformation control of concrete structures

Aidana Bazarbay *
Electronics, Telecommunications, and
Space Technologies Department
Satbayev University
Almaty, Kazakhstan
aidanamuratovna98@gmail.com

Zhadiger Torekhan
Electronics, Telecommunications, and
Space Technologies Department
Satbayev University
Almaty, Kazakhstan
toreshka31@gmail.com

Aziskhan Amir
Electronics, Telecommunications, and
Space Technologies Department
Satbayev University
Almaty, Kazakhstan
amir.aziskhan@mail.ru

Beibarys Sekenov
Electronics, Telecommunications, and
Space Technologies Department
Satbayev University
Almaty, Kazakhstan
sekenov1120@gmail.com

Moldyr Baigulbayeva
line 2: dept. name of organization
(of Affiliation)
Al-Farabi university
Almaty, Kazakhstan
Mur_aly.kz@mail.ru

Almat Baikhozhayev
Electronics, Telecommunications, and
Space Technologies Department
Satbayev University
Almaty, Kazakhstan
almat-93@mail.ru

Abstract—Concrete structures are an integral part of modern construction. They have high strength and durability, but they are susceptible to various types of deformation. Deformation control of concrete structures is an important task, the solution of which ensures safety and reliability of buildings and structures. The application of the Brillouin method for deformation control of concrete structures opens up new opportunities in the construction industry. This method makes it possible to check the quality of concrete without disturbance, determine the degree of its deformation and predict possible defects. As a result of the work, the basic principles and requirements of the Brillouin method were considered. Experimental work has been carried out to get accurate information about the results. In this paper discusses the new results of Brillouin scattering using the MATLAB software.

Keywords— Brillouin method, concrete structures, BOTDA, MATLAB software.

I. INTRODUCTION

Concrete structures are an integral part of modern construction [1]. They have high strength and durability, but they are susceptible to various types of deformation. Deformation control of concrete structures is an important task, the solution of which ensures safety and reliability of buildings and structures. Deformation can result from a number of reasons, including as variations in temperature and humidity as well as the overall impact of static and dynamic stresses on the structure. In addition, the curing process of the material contributes to deformation [2]. The application of the Brillouin method for deformation control of concrete structures opens up new opportunities in the construction industry. This method makes it possible to check the quality of concrete without disturbance, determine the degree of its deformation and predict possible defects [3].

The use of Brillouin Optical Time-Domain Analysis (BOTDA) technology and its modifications has proven its effectiveness in controlling modifications within the circumstance of constructing systems. This affords non-stop monitoring and allows timely detection of capability threats to their integrity. Modern techniques of Brillouin frequency shift analysis are described in [4] wherein dimension approaches and their software in fiber optic sensing are discussed in detail. Such methods offer excessive sensitivity and reliability in controlling structural changes, making them critical gear within the practice of monitoring production objects. The

practical application of distributed fiber optic sensors based on Brillouin scattering is illustrated by [5] which describes a method for measuring cracks in building structures using Brillouin scattering spectra. Brillouin technology is employed as well as for deformation monitoring of concrete structures, in addition in other areas [6]. This awareness is essential to optimize the implementation of the technology in multiple engineering assignments such as condition monitoring of bridges, tunnels and other crucial structures [7]. In addition to fiber optic technologies, exploration on the deformation characteristics and penetrability of concrete using reclaimed aggregates emphasizes the importance of advanced materials and methods to improve the stability and durability of structures [8].

Nevertheless, to maximize the effectiveness of the Brillouin method and other deformation control strategies for concrete systems, some of studies demanding situations need to be addressed, inclusive of improving the dimension accuracy beneath external influences. To solve the problem of improving the accuracy of measurements in the conditions of external influences it is possible to use the MATLAB program, which allows to simulate fiber-optic sensors and optimize their parameters taking into account the factors affecting the accuracy of measurements, such as temperature fluctuations and mechanical deformations.

A. Novelty and Contribution

The novelty of this study exists in the incorporation of Brillouin scattering-based fiber-optic sensors for real-time, non-intrusive observation of deformation in concrete structures. As opposed to conventional techniques, this approach enables early recognition of damage and deformation without demanding any physical involvement. The use of Matlab modeling and emulation software further improves measurement accuracy by accounting for external variables such as changes in temperature and humidity. By modeling these parameters, we aim to improve sensor placement and increase the reliability of the surveillance system under real-world conditions.

The main contribution of this study is the development and evaluation of an approach to apply the Brillouin method for condition monitoring of concrete structures. The study contains practical recommendations for implementing the method and modeling its effectiveness using Matlab software.

Рисунок А2 – Подтверждение участия и публикации в материалах международной конференции. «Study and application of Brillouin method for deformation control of concrete structures» (IEEE, 2025)

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева

Магистрант по образовательной программе
«7M06201 – Телекоммуникация»
Байхожаев Алмат Серікұлы

Отзыв научного руководителя
к магистерской диссертации

Тема: «Исследование волоконно-оптических датчиков для мониторинга
чрезвычайных ситуаций»

Магистерская диссертация посвящена актуальной научно-технической задаче разработки и исследования волоконно-оптических датчиков для мониторинга чрезвычайных ситуаций и критически важной инфраструктуры. Выбор темы обоснован возрастающими требованиями к надёжности, помехоустойчивости и распределённому характеру систем мониторинга в условиях усложнения современных инфраструктурных объектов.

В работе выполнен анализ современных волоконно-оптических сенсорных технологий, включая датчики на основе волоконных брэгговских решёток. Автор демонстрирует понимание физических принципов работы FBG-датчиков и корректно выделяет их преимущества по сравнению с традиционными электрическими средствами измерений. Существенным достоинством диссертации является выполнение численного моделирования отклика FBG-датчика на температурные и деформационные воздействия в специализированной программной среде, а также анализ спектрального сдвига отражённого сигнала.

Полученные результаты обладают практической значимостью и могут быть использованы при проектировании и оценке параметров волоконно-оптических систем мониторинга чрезвычайных ситуаций. Следует отметить стремление автора рассмотреть вопросы обработки и интерпретации данных, что расширяет перспективы дальнейшего развития работы.

Магистерская диссертация отличается логичной структурой, последовательным изложением материала и корректным использованием современной научно-технической литературы. Поставленные цель и задачи в целом достигнуты, выводы обоснованы результатами анализа и моделирования.

Считаю, что магистерская диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным квалификационным работам, а её автор заслуживает присвоения степени магистра по соответствующему направлению подготовки. В этой связи работа оценена на «хорошо» (85%) и рекомендуется на защиту.

Научный руководитель

Satbayev University

PhD, профессор каф. «ЭТиКТ»

Смайлов Н.

2026 г.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева

Магистрант по образовательной программе
«7М06201 – Телекоммуникация»
Байхожаев Алмат Серікұлы

Резенция
к магистерской диссертации

Тема: «Исследование волоконно-оптических датчиков для мониторинга
чрезвычайных ситуаций»

Диссертационная работа Байхожаева Алмата Серікұлы, посвящена разработке и исследованию волоконно-оптических датчиков для мониторинга чрезвычайных ситуаций и критически важной инфраструктуры, что является актуальной научно-технической задачей в условиях роста техногенных и природных рисков. Обоснована необходимость применения помехоустойчивых и распределённых систем мониторинга.

В работе выполнен анализ современных волоконно-оптических сенсорных технологий, включая датчики на основе волоконных брэгговских решёток, показаны их преимущества по сравнению с традиционными электрическими датчиками. Проведено численное моделирование отклика FBG-датчика на температурные и деформационные воздействия с анализом спектрального сдвига отражённого сигнала, что позволяет связать внешние воздействия с измеряемыми оптическими параметрами.

Полученные результаты имеют прикладное значение и могут быть использованы при проектировании систем мониторинга чрезвычайных ситуаций. Работа логично структурирована, выводы обоснованы результатами моделирования и анализом современной научной литературы.

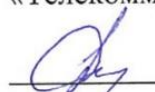
В целом диссертационная работа представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, выполненное на хорошем теоретическом и методическом уровне, соответствует требованиям, предъявляемым к работам данного уровня, а её автор заслуживает присуждения соответствующей академической степени (квалификации).

Работа оформлена в соответствии с установленными требованиями, содержит аналитические таблицы и рисунки. В целом, содержание и объём диссертационной работы полностью соответствует стандартам и профилю специальности, характеризуют достаточную теоретическую подготовку магистранта. Данная магистерская работа по своему содержанию вполне отвечает выбранной теме, раскрывает ее, удовлетворяет предъявленным к магистерским работам требованиям и заслуживает оценку

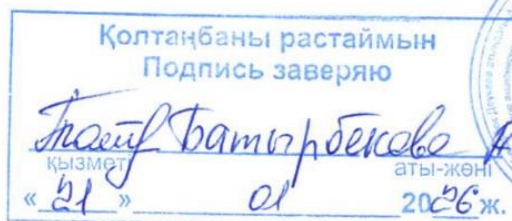
90 А-

Рецензент

Energo university,
PhD, профессор кафедры
«Телекоммуникационная инженерия»

 Ермекбаев М.М.

« 21 » 01 2026 г.



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Байхожаев Алмат Серікұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование волоконно-оптических датчиков для мониторинга чрезвычайных ситуаций

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 0.7

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 18

Знаки из здругих алфавитов: 79

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2026-01-20

Дата



Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Байхожаев Алмат Серікұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование волоконно-оптических датчиков для мониторинга чрезвычайных ситуаций

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 0.7

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 18

Знаки из здругих алфавитов: 79

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2026-01-20

Дата



Сұңғат Марқсұлы

проверяющий эксперт

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Байхожаев Алмат Серікұлы

Тақырыбы: Исследование волоконно-оптических датчиков для мониторинга чрезвычайных ситуаций

Жетекшісі: Нуржигит Смайлов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 0.7

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0

Дәйексөз (35): 0.3

Әріптерді ауыстыру: 79

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 18

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

2026-01-20

Күні



Кафедра меңгерушісі

